

# 陕西关中增雨播云线源输送扩散数值模拟

余兴,戴进

(陕西省气象科技创新基地,陕西西安 710015)

**摘要:**利用层状云播云线源输送扩散三维时变烟团轨迹模式,通过对陕西关中飞机增雨作业实例的数值模拟研究,结果表明:模拟的播云线源输送扩散特征与输送扩散的基本理论和一般规律相吻合,并且再现了非垂直(与风向)多条播云线源非均匀非定常的输送扩散特点;浓度等值线的水平分布和垂直分布均不规则,比均匀定常点源更为复杂,整体不满足高斯浓度分布,表明在这种情况下均匀定常模式已不适用。另外,模式能够精确地模拟出播云线间的精细结构。播云线源水平输送距离1 h平均为65 km,扩散速率1 h平均为0.82 m/s。

**关键词:**播云线源;输送扩散;水平输送距离;扩散速率;数值模拟

**中图分类号:**P481 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-274X(2002)04-0425-04

飞机人工增雨是由飞机携带催化剂入云改变云的微物理结构和动力结构,提高降水效率以增加降雨,而外场作业和试验的效果却显示出相当大的变异性。这一点说明,在实践中除必须研究天气条件、作业对象外,还必须研究播云催化剂在云中的输送扩散,既要考虑使其不至于在局部产生过量催化,又能在播云区内产生最大的有效作用区。为此,本文利用已建立的非均匀、非定常云中催化剂输送扩散的模拟系统<sup>[1]</sup>,对层状云增雨播云非垂直多条线源的非均匀、非定常输送扩散进行模拟研究,得出其分布特征和变化规律。

## 1 模拟系统的建立

模拟系统由一个三维时变烟团轨迹模式和一个三维细网格非静力模式组成。

### 1.1 烟团轨迹模式

烟团轨迹模式是用一系列分离的烟团来表征播云线。为了进一步考虑垂直风切变对扩散的影响,每个烟团又在垂直方向上分成7个子烟团。假定各子烟团内部的浓度分布为高斯型。

$t$ 时刻任一子烟团中心的风场分量分别为 $u(t, x', y', z')$ ,  $v(t, x', y', z')$ ,  $w(t, x', y', z')$ ,则在 $t +$

$\delta t$ 时刻此子烟团的位置为

$$x_i(t + \delta t) = x'_i(t) + u(t', x', y', z')\delta t, \quad (1)$$

$$y_i(t + \delta t) = y'_i(t) + v(t', x', y', z')\delta t, \quad (2)$$

$$z_i(t + \delta t) = z'_i(t) + w(t', x', y', z')\delta t. \quad (3)$$

式中: $\delta t$ 为计算时步, $t + \delta t$ 时刻水平扩散参数 $\sigma_y$ 和垂直扩散参数 $\sigma_z(m)$ 为

$$\sigma_y^2(t + \delta t) = \sigma_y^2(t) + 2K_y(t, x, y, z)\delta t, \quad (4)$$

$$\sigma_z^2(t + \delta t) = \sigma_z^2(t) + 2K_z(t, x, y, z)\delta t. \quad (5)$$

式中 $K_y, K_z$ 分别为水平和垂直的湍流扩散系数。

$t$ 时刻 $m$ 烟团 $n(1, 2 \dots 7)$ 子烟团浓度分布为

$$C(t, x, y, z)_{nm} = \frac{Q_n}{(2\pi)^{3/2}\sigma_y\sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{\exp\left[-\frac{(z-z_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(2H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\}. \quad (6)$$

其中: $x, y, z$ 为子烟团的位置, $H$ 为云顶高度(m), $x, y, z$ 为网格坐标, $Q_n$ 为 $n$ 子烟团含AgI粒子个数。在实际处理过程中是将变形的烟团理想化为一个大的椭球体,把椭球体在垂直方向上分离成7个大小不等的子烟团,由椭球积分得到7个子烟团的粒子数为: $Q_1 = Q_7 = 0.020 Q_T, Q_2 = Q_6 = 0.136 Q_T, Q_3$

收稿日期:2001-11-30

基金项目:国家科技部“西部开发科技行动”重大攻关资助项目(2001BA901A41)

作者简介:余兴(1962-),男,江西乐平人,陕西省气象科技创新基地高级工程师,理学硕士,从事大气物理方面的研究。

$=Q_5 = 0.220 Q_T, Q_4 = 0.248 Q_T, Q_T$  为烟团含 AgI 粒子个数。

某一时刻瞬时浓度的计算为:首先确定该时刻在模拟域内每一个子烟团的位置,其次据式(6)计算其浓度空间分布,最后叠加得到瞬时浓度的空间分布。背景场则采用三维细网格非静力模式的预报结果。

### 1.2 三维非静力模式

为了引进下边界的地形作用,对垂直坐标作如下变换

$$z^* = h_d(z - h_d)/(h_d - Z_g)。$$

其中: $z^*$  为变换后的垂直坐标, $z$  为笛卡尔坐标系中的垂直坐标。 $h_d$  为模式顶高, $Z_g$  为地形高度。经坐标变换后,模式由包含速度分量、位温、水汽、湍能、耗散率的预报方程和滞弹性连续方程的三维非静力控制方程组构成,方程组和计算方法见文献[1]。

## 2 模拟结果分析

受 500 mb 高空槽和 700 mb 低涡系统东移的影响,陕西省境内从 1998 年 4 月 11 日至 12 日普降

小到中雨,此次降水为明显的层状云降水过程,系统稳定,覆盖范围广,云顶和云底高度分别为 6 500 m 和 1 250 m。陕西省人工影响天气中心充分利用有利时机,对关中地区及时实施了飞机人工增雨作业。11 日 13:59(北京时间,以下同)飞机起飞,15:15 落地,实际播云从 14:15 至 15:00 持续 45 min,耗 AgI 675 g,具体播云航线为:A(麟游)→B(眉县)→C(永寿)→D(周至)→E(咸阳)→F(富平)→G(渭南),播云总线长 327 km,播云层高度、温度和风速分别为 4 500 m、-6℃和西西南风 18 m/s。本文对这次增雨作业个例进行了数值模拟。

模拟水平范围 300 km×300 km,107°25′~110°48′ E, 33°24′~36°00′ N(图略)。

三维非静力模式格点数 61×61×20,采用拉伸网格,模式顶高 6 785 m,积分时步 10 s。在烟团模式中,计算烟团轨迹和扩散参数( $\sigma_y, \sigma_z$ )所采用的网格同上,而计算浓度则采用 300×300×28 的均匀网格,水平格距 1 km,垂直格距 200 m(1 100 m 为第一层),积分步长 10 s,模式中湿清除率<sup>[2]</sup>取  $3.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 播云过程中不同时刻催化剂源的初始位置

Tab. 1 The initial positions of 6 line sources

时 间	14:15(A)	14:21(B)	14:30(C)	14:39(D)	14:46(E)	14:54(F)	15:00(G)
$X_0/\text{km}$	33.4	28.8	67.4	72.0	119.9	161.3	189.8
$Y_0/\text{km}$	142	96.5	144.2	77.6	110.9	149.8	124.2

催化剂源强为  $0.25 \times 10^{13}$  个/s(取 -6℃时 AgI 的核化率为  $10^{13}$ )。初始位置  $X_{0m} = x(t), Y_{0m} = y(t), Z_{0m} = 4 500$  (表 1),  $m$  为第  $m$  个烟团,是时间的分段函数。每 10 s 引入一个烟团,45 min 共引入 270 个烟团。

### 2.1 三维非静力模式模拟结果

分析和对比<sup>[1,3]</sup>表明,本文所建的三维非静力细网格模式的模拟结果能较准确地揭示复杂地形大气流场和湍流场的特征,所得结论与理论分析和其他的模拟结果相吻合,把它作为云中源扩散的气象背景场是可取的。

### 2.2 烟团轨迹模式的模拟结果分析

表 2 是模式计算得到的不同时刻的催化剂浓度

表 2 不同时刻催化剂浓度极大值

Tab. 2 Maximum concentrations ( $\text{L}^{-1}$ ) every 10 min.

时 间/min	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
浓 度/个· $\text{L}^{-1}$	1 119.3	1 033.6	1 285.4	1 247.4	526.4	47.1	22.7	14.3	9.6	7.3	6.0	5.1

通过对模拟结果图分析,发现等值线水平分布

极大值,表中的时间从 14:15 开始计算。由表 2 可见,50 min 以前(播云的进程中),AgI 浓度极大值为  $10^3$  个/L 量级,50 min(播云结束后 5 min)以后,AgI 浓度极大值为  $10^1$ /L 量级,浓度极值随时间递减。进一步分析模拟结果图(图略)可看出,浓度等值线变稀疏,扩散范围逐渐加大,线源在扩散的同时,受大气流场的输送作用,播云线不断地向东北移动,各时刻线源扩散范围是水平大于垂直,因为  $\sigma_y$  大于  $\sigma_z$  所致。播云线源受风场作用而输送的同时又受湍流场作用扩散的这些基本特征与输送扩散的基本理论和一般规律相吻合<sup>[1,2,4,5]</sup>。

和垂直分布不规则,直线源发生形变,多条播撒线出

现叠加。不同时刻播云线的输送扩散状况也不同,不同播云线的输送扩散状况不同,同一播云线的不同部位的输送扩散状况也不同。在垂直方向上,线源浓度中心位置并不保持在播云高度,而是随时间空间变化。这些特点充分反映出气象场的非均匀非定常作用,如果气象场是均匀定常的,则分布和变化也是均匀规则的。AgI 浓度分布的非均匀非定常特征说明整体不满足高斯浓度分布,均匀定常模式不再适合这种情况下的数值模拟。

模式模拟的多条线源输送扩散特征与真实播云线对应的非常一致,反映在:① 模拟的播云线长随时间增长现象与实际播云进程吻合;② 模拟的 6 条播云线输送扩散图形十分清晰,与实际播云线相对应;③ AB 线在飞行时呈南北走向,由于飞机是边飞行边撒播,在西西南气流的作用下使 AB 呈东北—西南走向,这一点正好与模拟结果一致;④ 反映出

线源的细微差异。飞行路线 DE 和 EF 两条线源夹角近似  $180^\circ$ ,在模拟结果中同样能够反映出来,这些表明模式对线源的微小差别也能模拟得很好。

综上分析表明,模式能够精确地模拟出云中多条线源非均匀非定常输送扩散特征,同时也能模拟出线源间的精细结构。

### 2.3 水平输送和扩散速率的模拟结果分析

在增雨作业中,需要根据水平输送距离确定增雨落区,基于此,科学地选定效果检验中的目标区、缓冲区、对比区,又需要根据播云线源扩散速率科学地设计播云间距。因此,通过个例模拟研究,得出他们的量化概念。

选取 AB,BC,CD,DE,EF,FG 6 段播云线的中点,表征各线源的水平输送状况(表 3)。

给出了每隔 10 min 6 段播云线水平输送距离的极大( $R_{\max}$ )、极小( $R_{\min}$ )和平均值( $\bar{R}$ )。

表 3 线源入云后水平输送的模拟结果

Tab. 3 Maximum, minimum and average of transport distances for every 10 min

T/min	10	20	30	40	50	60
$R_{\min}/\text{km}$	9.2	18.6	28.1	37.7	47.6	57.8
$R_{\max}/\text{km}$	11.1	22.7	34.6	46.5	58.3	70.0
$\bar{R}/\text{km}$	10.4	21.2	32.1	43.1	54.1	65.1

表 3 中的时间指线源入云后所经历的时间,平均水平输送距离( $\bar{R}$ )指 6 段线源的平均。由式(1),(2),(3)可知,水平输送距离仅取决于风场。从表 3 中可见,各段线源的水平输送不同,差异随时间增大,呈辐射状。即:从 10 min 的 1.9 km 到 60 min 的 12.2 km,增加 5.4 倍。在 1 h 后达到 65 km,相当于

18.1 m/s 平均风速输送 1 h 的距离。水平输送速率随时间变化不明显。

表 4 是模式计算的每 10 min 间隔 270 个烟团中扩散半宽的极大( $W_{\max}$ )、极小( $W_{\min}$ )、平均值( $\bar{W}$ )和扩散速率( $V_{\text{Dif}}$ )。

表 4 线源入云后扩散的模拟结果

Tab. 4 Maximum, minimum and average horizontal half width of diffusion and horizontal diffusive rate for every 10 min

T/min	10	20	30	40	50	60
$W_{\min}/\text{m}$	583.9	1 001.1	1 412.4	1 822.8	2 234.4	2 652.3
$W_{\max}/\text{m}$	722.5	1 272.0	1 805.8	2 321.7	2 824.2	3 313.8
$\bar{W}/\text{m}$	644.0	1 119.2	1 586.8	2 049.9	2 509.9	2 966.9
$V_{\text{Dif}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.07	0.93	0.88	0.85	0.84	0.82

表 4 中的平均是对所有烟团的平均。从表 4 中可见,各线源扩散不尽相同,差异随时间明显增大,从 10 min 的 138.6 m 到 60 min 的 661.5 m,增加 3.8 倍。 $V_{\text{Dif}}$ 随时间逐渐减小,变化越来越缓慢,1 h 平均为 0.82 m/s。270 个烟团扩散呈多峰(3 个极大 2 个极小)的波浪状,振幅随时间明显增大,扩散位于极大值的有:标记为 1,80,240 周围的烟团,极小值的有:标记为 40,160 周围的烟团。

### 2.4 模拟结果讨论

检验模拟播云线源在云中的输送扩散结果非常困难,目前难以做到,因此本文用一些特征和特征值对模拟结果讨论其似真性。

从模拟的特征来看,模拟结果与实际播云过程非常一致,同时很好地反映出非垂直、非均匀、非定常特征,与输送扩散的基本理论相吻合。

从浓度极值来看,烟团分离的物理假设是把撒

播 10 s 长的线源视为网格点上的一个点源,然后在气象场的作用下输送扩散。一个烟团含有 AgI 粒子  $2.5 \times 10^{13}$  个,一个网格体积  $0.2 \text{ km}^3$ ,因此,模式检出的最大极值浓度应为  $10^2$  个/L。模拟结果中的最大极值浓度为  $10^3$ /L (表 2),相当于播云线在  $0.02 \text{ km}^3$  体积内均匀混合,等同于刚撒播的  $1 \text{ km}$  长线源扩散几百米宽几十米厚的范围,而不是立即充满  $0.2 \text{ km}^3$  体积块,这更接近实际。播云结束 5 min 后为  $10^2$  个/L,15 min 后为  $10^1$  个/L,表明模拟的值是较为合理的。

从水平输送距离看,1 h 平均为 65 km,相当于  $18.1 \text{ m/s}$  平均风速输送 1 h 的距离,与播云高度上 08:00 风速一致。

从扩散速率来看,随时间逐渐减小,变化越来越缓慢,1 h 平均为  $0.82 \text{ m/s}$ ,比边界层的值小,比自由大气的值大,与云中扩散理论吻合。

上述讨论表明,模式的模拟结果是合理的。但是,数值模拟毕竟是数值模拟,与客观实际必然存在

差异,在没有客观检验的前提下,对其结果应持谨慎态度。实验室实验和外场观测的客观检验是改进和完善模式的有效手段,也是我们努力的方向。

### 3 结 论

综上所述,得到以下主要结论。

1) 模拟结果反映出云中播云线输送扩散的普遍特征,这些特征与输送扩散的基本理论和一般规律相吻合。

2) 模式能够精确地模拟出云中多条播云线源非均匀非定常输送扩散特征,浓度等值线水平、垂直分布均不规则,比均匀定常点源更为复杂,整体不满足高斯浓度分布,表明均匀定常模式已不适用。

3) 模式能够精确地模拟播云线精细结构,再现多条播云线的输送扩散特征。

4) 播云线源水平输送距离 1 h 平均为 65 km,扩散速率 1 h 平均为  $0.82 \text{ m/s}$ 。

### 参考文献:

- [1] 余 兴,樊 鹏,王晓玲,等.层状云中非垂直多条撒播线源催化剂扩散的数值模拟[J].气象学报,1998,56(6):708-723.
- [2] 申亿铭.云中催化剂的扩散[M].北京:气象出版社,1994.69-82;130.
- [3] 余 兴,王晓玲,戴 进,等.复杂地形边界层结构的数值模拟[J].高原气象,1997,16(4):389-401.
- [4] 申亿铭.过冷云中飞机播撒催化剂的扩散问题[A].气象科技集刊[C].北京:气象出版社,1982.17-26.
- [5] 申亿铭,陈吉航.飞机播撒催化剂扩散问题的数值解法[J].气象学报,1986,44(4):440-446.

(编 辑 徐象平)

## Numerical simulation of transport and diffusion of seeding line source in Guanzhong Region

YU Xing, DAI Jin

(Base of Meteorological Innovation of Shaanxi Province, Xi'an 710015, China)

**Abstract:** A formulated three-dimensional time-variable puff model is used to stimulate an operation of rain enhancement. The model results show that the simulated diffusive features of multiple line sources not only are consistent with basic theory of diffusion, but also reproduce their characteristics of heterogeneity and unsteadiness non-vertical to wind direction. The horizontal and vertical concentration distributions are irregular, and more complex and variable with space and time, compared to diffusion of vertical line source under homogeneous and steady point source. Besides, the model can simulate the subtle and detailed structure of each line source. For the seeding line sources, the average horizontal transport distance reaches 65 km after 1 hour, and the diffusion rate is  $0.82 \text{ ms}^{-1}$  for average of one hour.

**Key words:** seeding line sources; transport and diffusion; horizontal transport distance; diffusion rate; numerical simulation