

NOAA 卫星云图反映播云物理效应

余 兴 戴 进 雷恒池 徐小红 樊 鹏 陈争旗 段昌辉 王 勇

(陕西省气象科学研究所, 西安 710015; 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 陕西省人工影响天气中心, 西安 710015; 咸阳市气象局, 咸阳 712000. E-mail: yuxing23@163.com)

摘要 2000 年 3 月 14 日 14:15 至 15:49, 在陕西省境内实施了 1 次 AgI 飞机人工增雨作业. 播云 80 min (15:35)后, NOAA-14 卫星接收的资料显示, 播云后云顶形成了一条清晰的折线云迹, 其长度为 301 km, 平均宽度为 8.3 km, 最大宽度达 11 km. 形状与播云线相似, 位置和宽度有所不同, 可能为催化剂输送扩散所致. 为了证实云迹是播云物理效应的反映, 验证输送扩散模式的似真性, 利用 3D 非均匀非定常输送扩散模式, 通过催化剂输送扩散的数值模拟, 对 15:35 的模拟结果与卫星云图上云迹的多方面比较、对比分析表明: 云图上每段云迹都与每段催化剂的输送扩散一一对应, 位置、长度、宽度及变化趋势基本一致. 云迹是播云物理效应在云顶的直观反映, 说明播云物理效应区能响应催化剂的输送扩散状况. 从各段云迹的显现、消失时间和宽度随时间的变化分析, 结合数值模拟结果, 发现每段播云线的主要影响时段约为 20 ~ 80 min, 宽度达到较大的时间约为 50 ~ 70 min. 通过比较表明模式能够较好地反映出催化剂输送扩散的主要特征, 模拟结果也较为准确合理.

关键词 播云物理效应 极轨卫星 播云催化剂 输送扩散 数值模拟 比较

现代人工影响天气始于 1946 年, 当 Schaefer^[1]在实验室内意外发现, 干冰(固态二氧化碳)投入冷箱的“过冷雾”中, 在其下落路径上迅速出现了大量细小冰晶, 随后在马萨诸塞州西部用一架小型飞机, 对过冷层积云进行催化试验. 当干冰播入云中后使云水转化为降雪, 发现雪晶从云内降落在云内形成一个云洞, 开创了人类有史以来的有意识人工影响天气. 随后 Vonnegut 发现: 在温度低于 -5 的云中, AgI(碘化银)粒子同样能产生大量的冰晶. 之后, 许多类似的试验结果表明, 对厚度小于 1 km 的过冷层状云播云, 能形成清晰的云迹, 其宽度约为 35 min 扩展 3 km, 持续时间超过 2 h. 对较厚的层云催化也会出现结晶现象, 但常常不会形成云洞^[2,3].

播云云迹的可视化观测为大范围的人工增雨作业提供了基础. 40 年后, 在广阔的海洋上空, 卫星观测到在薄的海洋性层云中, 形成了与船迹线一致的云迹, 为许多船排放的大量气溶胶所致, 这些气溶胶改变了云含水量、粒子大小和光学特性^[4]. 随着卫星技术的发展, Rosenfeld 等人^[5-8]利用卫星反演方法, 研究了森林大火产生的烟气、城市和工业污染物等对降水的抑制作用, 以及大盐核对降水的恢复作用, 卫星能很容易地探测到无意识的人工影响效应. 但卫星探测有意识的人工影响效应, 除一次有可能为对对流云作业^[9]外, 至今仍没有探测到其他的有意识

人工影响播云效应, 尤其是层状云的.

播云催化剂的输送与扩散, 是人工影响天气的难点之一, 在 2004 年的国际云降水物理大会报告中, 播云催化剂在云中的输送扩散仍是制约学科发展的问题之一^[10]. 研究催化剂在云中的输送扩散, 了解其输送的位置和扩散范围, 对于指导人工影响天气作业具有一定的意义. 但是, 云中催化剂的输送扩散研究有一定的困难: 一是云中的输送扩散与边界层有区别, 离人类最近的边界层扩散研究也还存在着许多不确定性, 而对云的了解更有限, 云中的不确定性更大; 二是室内无法构造出较为真实的云, 供室内做云中输送扩散的流体模拟; 三是示踪试验花费高、难度大, 数值模拟又缺乏许多相应的试验基础. 这些使得播云催化剂在云中的输送扩散研究较为缓慢, 还有许多问题没有得到很好的解决.

国外对催化剂的输送扩散研究多采用示踪试验和数值模拟相结合的方法. Holroyd 等人^[11]通过一系列冬季空中示踪试验分析了在科罗拉多州大方山地区从高空和地面释放的 AgI 烟羽的特征. Brintjes 等人^[12]利用三维时变模式计算了北亚利桑那复杂地形下示踪剂或播云催化剂的目标区. Warburton 等人^[13]通过雪中银含量的痕量测量研究了在 1978 和 1992 年内华达山脉中部两大目标区及周围播云催化剂 AgI 的输送扩散. Li 等人^[14]根据 Pasquill 中性稳定度曲线给

定的扩散率,利用高斯烟羽扩散模式研究了不同成冰机制对降雨率和形势的影响。Levin等人^[15]在研究以色列静态撒播的有效性时,为了模仿撒播过程,将飞机描述成一个沿播云线前后匀速移动的点源。申亿铭等人^[16~18]对催化剂的输送扩散做了大量的研究工作,主要基于均匀、定常条件下的高斯模式输送扩散。研究表明,天气条件、气流、风切变、大气热力动力状况等都对催化剂的输送扩散产生影响,播云线的有效扩散速率一般约为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有时可达到 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到输送扩散的非均匀非定常性和受地形、风切变等作用的影响,余兴等人^[19,20]利用烟团轨迹模式和细网格湍能闭合模式,发展了三维云中催化剂的输送扩散模式,进行了个例模拟和似真性、总量守恒等方面的讨论,但模拟结果缺乏客观比较,存在一定的局限性。

2000年3月14日,在陕西省境内对过冷层状云实施了1次大范围的AgI飞机人工增雨作业,有幸的是,NOAA-14极轨卫星正好接收到了播云后的卫星资料,云图上显示的云迹形状与播云线相似。为此,利用这次卫星资料,通过对播云催化剂输送扩散的数值模拟结果与NOAA图像的比较,证实云迹是由播云造成的,为卫星反演播云效应提供基础,反演工作将在另文中介绍;验证输送扩散模式的模拟能力,分析似真性。这是首次利用卫星技术和数值模拟研究有意识人工影响天气播云效应。

1 模拟系统简介

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上的催化剂。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:

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

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

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

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

$$\sigma_y^2(t + \delta t) = \sigma_y^2(t) + 2K_y(t, x_s, y_s, z_s)\delta t, \quad (4)$$

$$\sigma_z^2(t + \delta t) = \sigma_z^2(t) + 2K_z(t, x_s, y_s, z_s)\delta t, \quad (5)$$

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 $n(1, 2 \cdots 7)$ 子烟团浓度分布为:

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

其中 x_s , y_s 和 z_s 为子烟团的位置, x , y 和 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: $Q_1 = Q_7 = 0.020Q_T$, $Q_2 = Q_6 = 0.136Q_T$, $Q_3 = Q_5 = 0.220Q_T$, $Q_4 = 0.248Q_T$, Q_T 为烟团含 AgI 粒子个数。

某一时刻浓度的计算为:首先确定该时刻在模拟域内每一个子烟团的位置,其次据(6)式计算其浓度空间分布,最后叠加得到该时刻浓度的空间分布。

1.2 三维非静力模式

三维非静力模式为烟团轨迹模式提供输送扩散的流场和湍流场。为了引进下边界的地形作用,对垂直坐标做如下变换:

$$z^* = h_d(z - h_d) / (h_d - Z_g),$$

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,详细的方程组和计算方法见参考文献[19,20]。

2 数值模拟与结果比较

2.1 播云试验与 NOAA 卫星资料

2000年3月14日,受锋面天气系统的影响,关中地区上空以As和Ac云为主,地面实况为零星小雨。14:15至15:49,陕西省人工影响天气中心在陕西关中与陕西南部地区组织了1次飞机人工增雨作业,使用An-26飞机AgI发生器(碘化银丙酮混合溶液燃烧成气溶胶播入云中)作业。播云路径为:A(西安,14:15)→B(咸阳,14:19)→C(武功,14:33)→D(麟游,14:42)→E(凤翔,14:48)→F(陇县,14:59)

→G(宝鸡, 15:08)→H(留坝, 15:21)→I(略阳, 15:35)→J(汉中, 15:49), 括号中表示地名和入云时间. 平均飞行速度为 $360\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 播云高度为 4.35 km , 温度为 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 播云 94 min 耗 AgI 1200 g ; 云底高度为 2.2 km ; 温度为 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 云顶高度为 $4.5\sim5.3\text{ km}$; 温度约为 $-13.0\sim-17\text{ }^{\circ}\text{C}$.

播云后 NOAA-14 极轨卫星正好飞临关中地区上空, 15:35 咸阳市农业遥感信息中心接收了卫星资料, NOAA/AVHRR 星下点的水平分辨率为 $1.1\text{ km}\times1.1\text{ km}$, 监测精度为 1.1 km . 利用地貌特征对卫星资料进行地标精确校正后, 用 1, 2, 4 通道合成图像(见图 1), 1 通道为可见光, 用蓝色表示, 2 通道为近红外, 用绿色表示, 4 通道为红外, 用红色表示. 图中 A', B', C', D', E' 和 G' 表示云迹拐点, H' 不可见没有标注, F' 点周围有缺口, 故用 E'' 和 F'' 表示. 从极轨卫星云图可见: 云迹的拐点 B', C', D', E' 和 G' 清晰, 云迹近似为折线, 两端窄中间宽, 最大宽度 11 km (C' 附近), 平均宽度 8.3 km ; 较宽区域位于云迹 C'D' 和 B'C' 后半段, 而不是 A'B' 段. 把云迹的空间变化转换到时间轴上, 分析云迹宽度随时间的变化发现, 播云线源刚入云时宽度较窄 (G' 周围云迹), 之后逐渐变宽 (E'E''), 达到较宽 (C'D', B'C' 后半段) 后又逐渐变窄 (B'C' 前半段)、消失 (A'B'), 与播云有效区域研究的结论一致^[21]. 1 段播云线扩展达到较宽的时间约为 $50\sim70\text{ min}$. 云迹的形状与播云线很相似, 位置和宽度有所不同, 可能为催化剂输送扩散所致.

虽然国外对催化剂输送扩散的研究多采用示踪试验的方法, 而示踪试验中的探测只能给出不同时刻 (有限) 不同空间点 (有限) 上的信息, 无法直接得到 1 个面上的完整图像, 但是, 卫星云图却能给出同一时刻 (15:35) 播云后云顶 (1 个面) 直观的完整的全貌. 所以, 这次卫星资料十分有利于对输送扩散模式的验证, 尤其是验证催化剂的输送位置、扩散后浓度等值线形状、扩散趋势, 其不足之处是无法验证模式对某一时刻某一空间点的浓度值是否准确.

2.2 数值模拟

考虑到催化剂输送扩散需要很细网格才能分辨

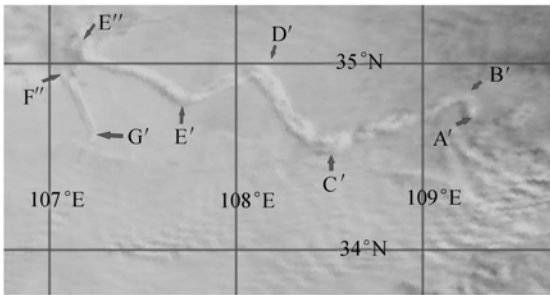


图 1 NOAA 卫星 1, 2, 4 通道合成图像

出其特征, 结合 NOAA 卫星资料的接收时间和云图中云迹的范围, 取模式的水平范围为 $33^{\circ}30'\sim35^{\circ}42'\text{N}$, $106^{\circ}50'\sim109^{\circ}30'\text{E}$, 即 $250\text{ km}\times250\text{ km}$. 水平格距 1 km , 垂直格距 0.2 km , 积分时步 20 s . 播云线取 AB, BC, CD, DE, EF, FG 和 GH 7 段, 共 66 min 耗 AgI 880 g , AgI 播撒率为 $0.22\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ (用催化剂播撒总量除以作业时间), 催化剂源强为 $1.11\times10^{13}\text{ s}^{-1}$ (取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 AgI 的核化率为 $5\times10^{13}\text{ g}^{-1}$). 由于作业中没有 GPS, 作业航线根据作业记录的时间和经纬度确定, 如果记录没有错误, 误差只在几公里, 而模式中取播云总线长约 400 km , 模式的水平格距 1 km , 能够满足研究的需要. 据作业记录得到各播云点的初始位置 $X_{0m}=x(t)$, $Y_{0m}=y(t)$, $Z_{0m}=4.35\text{ km}$ (见表 1), m 为第 m 个烟团, 是时间的分段函数. 每 20 s 引入一个烟团, 66 min 共引入 198 个烟团. 表 1 列出了播云线各点入云的时间和位置.

模式中假定催化剂粒子为隋性粒子. 利用 3 月 14 日 08:00 高空和地面资料输入到三维非静力模式中, 预报出各时刻的风场和湍流场, 再输入到烟团模式中, 作为烟团模式的背景场, 计算催化剂浓度的分布与演变. 运用模式以这次试验为例, 计算模拟域内播云催化剂的输送扩散, 模拟结果见图 2 和图 3, 图中 ABCDEFGH 为播云线初始轨迹, A'B'C'D'E'E''F''G' 为 NOAA 云图上云迹的中轴线位置. 等值线间隔为: $500, 100, 10, 5, 4, 1$ 和 0.5 L^{-1} .

2.3 模拟结果分析与客观比较

在这次作业中, 人工播撒入云的催化剂参与了

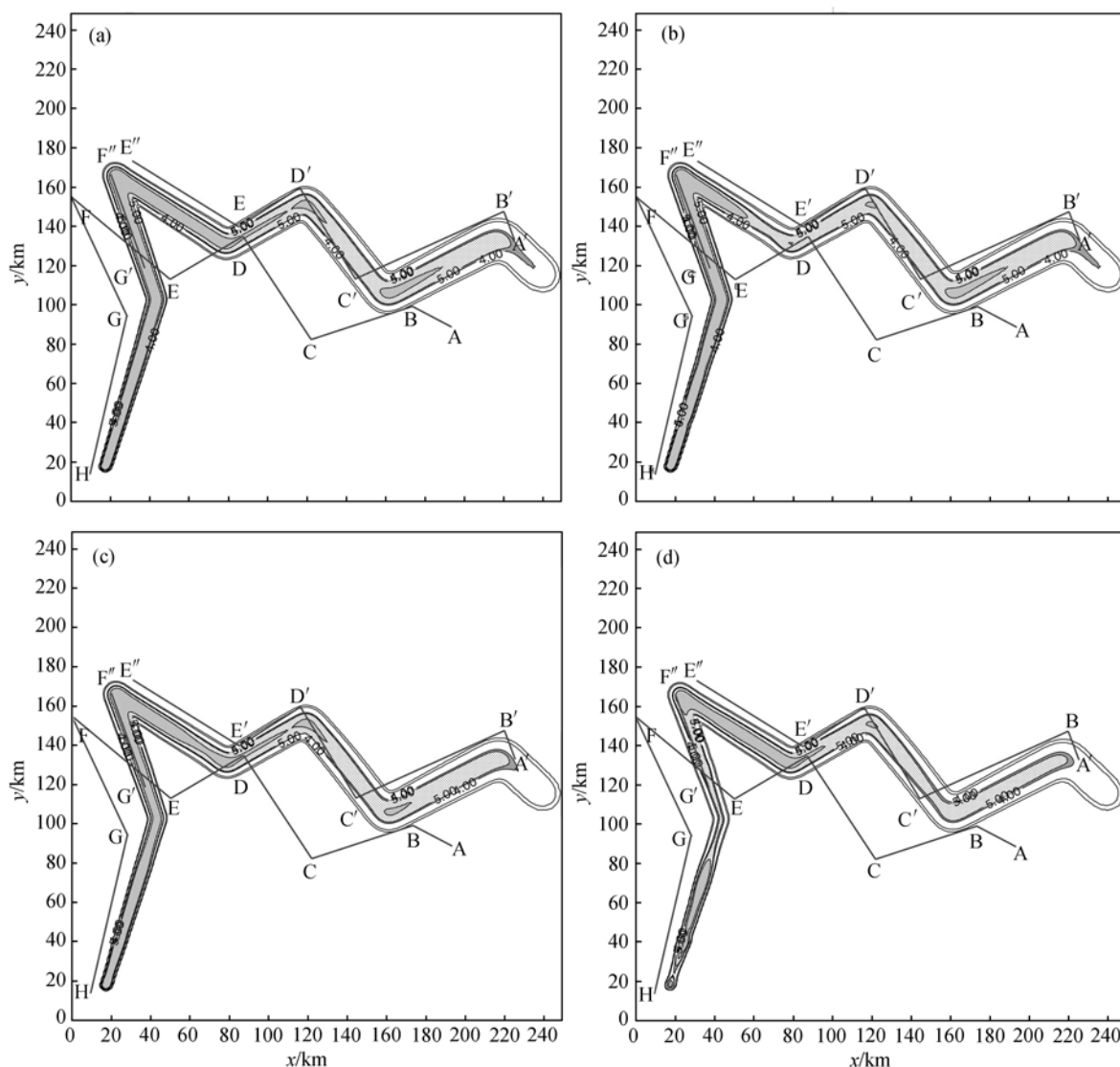
表 1 播云线各点入云的时间和位置

位置	A	B	C	D	E	F	G	H
时间	14:15	14:19	14:33	14:42	14:48	14:59	15:08	15:21
X_{0m}/km	192.9	173.4	122.2	86.8	50.4	0.0	27.5	9.3
Y_{0m}/km	89.0	100.1	83.4	135.7	113.4	155.7	94.5	14.5

云的物理过程,引起云宏观、微观结构的变化,这种变化反映到云顶,形成了云迹.云迹不是对某一高度上催化剂浓度的直观反映,很多高度的催化剂都会参与云的作用,对云迹的形成有贡献.因此,用某一高度上浓度等值线与云迹比较,都会存在一定的局限性,另外,云迹的位置与宽度,是对催化剂输送扩散状况某种程度的反映,两者存在一定的响应关系.所以,用地面投影浓度模拟结果与云迹比较,来证实云迹是播云造成、验证模式的似真性较为合理.地面投影浓度是指各高度上浓度在地面的垂直投影.

图2给出了模式计算得到80 min地面投影、播云高度、4.55和4.75 km高度上催化剂浓度分布.80 min正好对应NOAA卫星接收时间15:35.从图中可以看出:

(1) 15:35,地面投影、播云高度、4.55和4.75 km高度浓度分布位置基本一致,等值线宽度有所差异.从宽到窄分别是:地面投影、播云高度、4.55和4.75 km高度,播云高度上较宽,向上宽度变窄;但各段播云线变化不均匀,地面投影、播云高度的浓度等值线宽度大体相当.



(2) 由播云线输送的位置与云迹的位置对比发现, 播云线拐点位置普遍偏南、东西向较吻合, 表明模拟的 v 分量偏小, u 分量较好, 主要是 08:00 高空 500 hPa 为正西风; 播云线 BC 对应的浓度中轴线与云迹 B'C' 平行, 两者相差 13.0 km; CD 的浓度中轴线与云迹 C'D' 相交; DE 的浓度中轴线与云迹 D'E' 平行, 两者相差 6.5 km; EF 的浓度中轴线与云迹 E'E'' 平行, 两者相差 11.4 km; FG 的浓度中轴线与云迹 F''G' 近似重合; 催化剂输送的位置与云迹位置吻合, 每段播云线都与每段云迹一一对应. 表明云迹是由播云引起的, 模式对播云线的输送模拟较好, 三维非静力模式对动力场模拟也较合理. 云内平均速度 14:00 的模拟结果, u , v 和 w 分别为 9.96 , 3.76 及 $3.7 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 16:00 u , v 和 w 分别为 9.64 , 4.26 和 $4.1 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 云内有弱的上升气流, 播云后上升气流略有增强.

(3) 由催化剂地面投影浓度等值线外形、宽度与云迹的比较发现, 浓度大于 10 L^{-1} 和小于 1 L^{-1} 等值线外形、宽度与云迹的差异较大, 模拟结果还显示, 浓度 1, 4 和 5 L^{-1} 等值线的最大宽度分别为 18.3 (B 点附近), 11.4 km (C 点附近) 和 10.6 km (C 点附近), 平均宽度分别为 12.9, 8.6 和 7.9 km. 4 和 5 L^{-1} 等值线的宽度、形状与云迹相似, 4 L^{-1} 的更接近.

(4) 4 L^{-1} 等值线的宽度 (阴影区) 是两端窄中间宽, 与云迹的宽度变化一致. 即 AB, FG 和 GH 对应的阴影区宽度较窄, BC, CD 和 DE 较宽; 云迹 A'B', B'C' (前半段) 和 F''G' 窄, B'C' (后半段), C'D' 和 E'E'' 宽, 阴影区形状与云迹一致.

图 3 为模式模拟得到的催化剂地面垂直投影浓度分布随时间的变化. 每段播云线入云时, 其阴影区很窄, 之后逐渐变宽, 达到最宽后又逐渐变窄, 直到消失, 与云迹的宽度变化相对应.

综上所述表明, 每段催化剂的扩展状况与云迹的宽度相对应, 进一步证明了云迹是对播云作用的反映, 模式对输送扩散的模拟较好.

表 2 为实际播云线长、播云耗时、云迹长度、模式计算线长 (催化剂浓度为 4 L^{-1}). 分析表 2 发现, 模拟的播云线长 AB, CD, DE, EF 和 FG 与播云线长相近. 而 BC, GH 却长 11 km (20.4%) 和 9 km (11%), 模拟的总线长比播云总线长长 13 km (3.3%); 模拟线长 CD, DE 和 EF 与云迹线长相近, BC 短了 18 km (21.7%), AB, FG 分别长了 7 km (46.7%) 和 15 km (30%), 模拟的总线长 (GH 除外) 比云迹总线长长 18 km (6%). 云迹

线长 CD, DE, EF 与播云线长相近, 3 段共短了 18 km (10.5%), 而云迹 AB, BC, FG 与播云线长差异较大. 进一步分析发现:

(1) 播云点 F 对应的云迹出现了缺口 (见图 1), 导致播云线 FG 对应的云迹 F''G' 长度与实际播云线长出现了较大的偏差, 短 17 km (25.4%), 而模拟线长与实际播云线比较接近, 只短 2 km (3%).

(2) 15:35, 播云线 AB 经输送扩散后, 4 L^{-1} 区域正在消失, 宽度变窄, 线长为 22 km, 5 L^{-1} 线长仅有 5.4 km; 云迹 A'B' 长度 15 km, 比实际播云线短 8 km (34.8%), 但比 C'D', D'E' 和 E'F' 3 段的 10.5% 要短得多, 可能是播云线 AB 产生的云顶物理效应区正处于消失过程中. 如果这种可能性存在, 那么有理由认为, 播云线 AB 的影响时间约为 80 min 左右, 也就是说, 80 min 后影响区已处于消失过程中. 同理, 分析播云作用的起始时间, 播云点 G, H 入云时间分别为 15:08 和 15:21. 由图 1 可见, G 点有些模糊但还能分辨, 其后的云迹通过图像放大后也能分辨, 但更加模糊不清, 而 H 点根本不可见, 说明播云效应要反映到云顶需要 15 ~ 25 min. 从理论上说这是合理的, 一是 AgI 活化需要时间, 二是这种物理效应在云顶反映出来也需要时间.

对这个个例做两个假设, 一是所有播云线的影响作用均一; 二是主要影响时段的依据为播云物理响应在云顶的反映. 那么, 得到每段播云线的主要影响时段为 20 ~ 80 min. 这个值很有意义, 可作为估算增雨影响时间的参考值, 特别在设计物理检验探测方案中, 是个很重要的参数, 也就是说, 在这个时段之外, 即使穿越了播云有效作用区, 也可能探测不到明显的物理效应. 必须指出的是, 云迹是对云顶的直观反映, 而不是云中的反映, 其实播云首先是在播云高度上起晶化和增长作用, 然后再通过二次效应传播到云顶, 在云顶起作用后才能被卫星探测到. 所以, 云迹与云中的播云物理效应是有区别的, 从物理意义上看, 云中的播云物理效应比云迹更早、持续时间更长, 因为传播需要时间.

(3) 播云线 BC 对应的云迹长度、模拟线长比播云线分别长 29 km (53.7%) 和 11 km (20.4%). 由于这次播云没有 GPS, 播云航线为作业的宏观记录, 当时记录 BC 播云时间为 14 min, 飞行速度为 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 而线长只有 54 km, 三者不相符, 存在一定的不准确性; 另外, 分析每段云迹与播云线的对应关系发现,

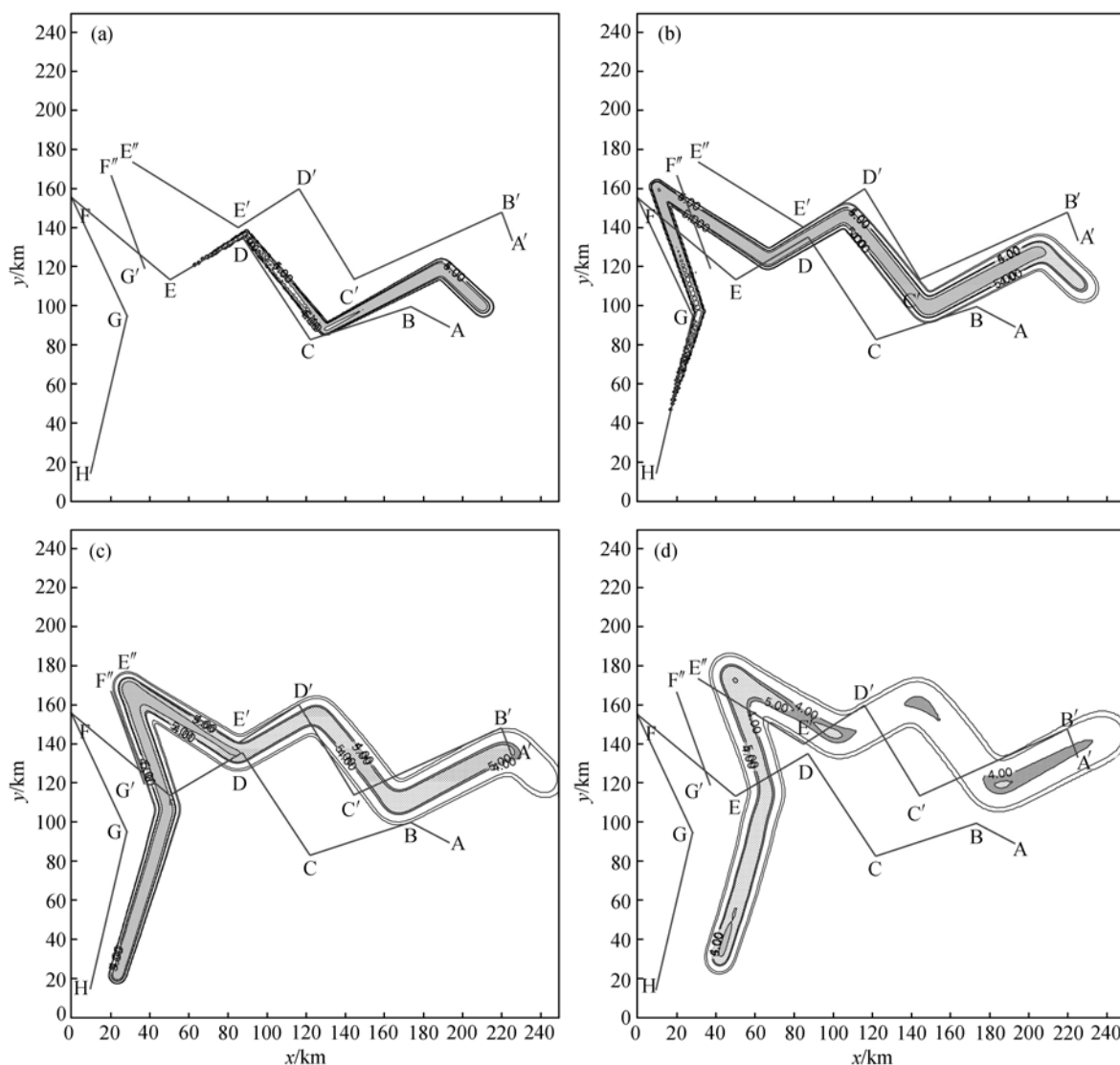


图 3 模式计算得到催化剂地面垂直投影浓度分布

(a) 14 : 45; (b) 15 : 15; (c) 15 : 45; (d) 16 : 15

表 2 播云线线长、云迹长度与模拟线长

播云线	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GH	合计
播云线长/km	23	54	63	43	66	67	82	398
播云耗时/min	4	14	9	6	11	9	13	66
NOAA/km	15	83	56	37	61	50	/	302
Model/km	22	65	60	44	64	65	91	411

云迹的其他段没有出现增长这么多的现象,也不存在使云迹增长这么多的机制。那么,可能的情况是,实际播云的 BC 长度很可能达 70~80 km 左右,其实作业记录也表明,从 A 飞往 B 是到达 B 点的东面,但没有记录具体的经纬度。数值模拟只能按 B 点的经

纬度计算(没有进行无依据的人为订正),也导致了模拟结果的偏差(线长比云迹短, CD 的浓度中轴线与云迹 C'D'相交).

综合分析, 催化剂输送扩散状况与云迹位置吻合、形状相似、每段线长相符, 说明云迹是由播云造

成的,是播云作用在云顶的反映,也与催化剂输送扩散状况相对应;同时表明模式能够反映出催化剂输送扩散的主要特征,模拟结果也较为准确合理.

3 结论

过冷层状云 AgI 播云作业,通过对播云线输送扩散的数值模拟结果与 NOAA 卫星资料的比较分析,表明:

() 播云开始后 80 min 在云顶形成了一条清晰的云迹线,其长度为 301 km,平均宽度为 8.3 km,最大宽度达 11 km,这条云迹是播云物理效应在云顶的直观反映,云图给出了此刻播云云顶直观的完整的全貌.

() 每段催化剂的输送扩散都与每段云迹一一对应,每段播云线的主要影响时段约为 20 ~ 80 min,宽度达到较宽的时间约为 50 ~ 70 min.

() 通过对输送位置、扩散宽度、每段线长等多方面的比较,证实了云迹是由播云造成的,同时表明模式能够反映出催化剂输送扩散的主要特征,模拟结果也较为准确、合理.

致谢 本工作受科学技术部“西部开发科技行动”重大攻关项目(批准号:2001BA901A41)和国家自然科学基金项目(批准号:40175003)资助.

参 考 文 献

- Schaefer V J. The production of ice crystals in a cloud of super-cooled water droplets. *Science*, 1946, 104: 457~459
- Langmuir I. *Collected Works of Langmuir*, Vols. 10 and 11, Suits G, Way H E, eds. New York: Pergamon Press, 1961
- Mason B J. *Clouds, Rain and Rainmaking*. Cambridge: Cambridge University Press, 1962.189
- Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, 1989, 245: 1227~1230
- Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophysical Research Letters*. 1999, 26 (20): 3105~3108[DOI]
- Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287 (5459): 1793~1796[DOI]
- Rosenfeld D, Lahav R, Khain A P, et al. The role of sea-spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes. *Science*, 2002, 297: 1667~1670[DOI]
- Rudich Y, Rosenfeld D, Khersonsky O. Treating clouds with a grain of salt. *Geophysical Research Letters*, 2002:29 (22): 2060~2064. doi:10.1029/2002GL016055, 2002.
- Woodley W L, Rosenfeld D, Strautins A. Identification of a seeding signature in Texas using multi-spectral satellite imagery. *J Wea Mod*, 2000, 32: 37~52
- Bruintjes R T, Garstang M. An Overview of the Recent National Research Council of the National Academy of Sciences Report on: Critical Issue in Weather Modification Research. In: *Proc. 14th International Conference of Clouds and Precipitation*. Bologna, Italy, 2004. 1204~1207
- Holroyd E W, McPartland J T, Super A B. Observations of silver iodide plumes over the Grand Mesa of Colorado. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(10): 1125~1144[DOI]
- Bruintjes R T, Clark T L, Hall W D. The dispersion of tracer plumes in mountainous regions in central Arizona: comparisons between observations and modeling results. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(4): 971~988[DOI]
- Warburton J A, Stone R H, Marler B L. How the transport and dispersion of AgI aerosols may affect detectability of seeding effects by statistical methods. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(9): 1929~1947[DOI]
- Li Zhidong, Pitter R L. Numerical comparison of two seeding material formation mechanisms on snowfall enhancement from ground-based aerosol generators. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(1): 70~85[DOI]
- Levin Z, Krichak S O, Reisin T. Numerical simulation of disposal of inert seeding material in Israel using a three-dimensional mesoscale model. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(5): 474~484[DOI]
- 申亿铭. 过冷云中飞机播撒催化剂的扩散问题. *气象科技集刊* (2). 北京: 气象出版社, 1982. 17~26
- 申亿铭, 陈吉航. 飞机播撒催化剂扩散问题的数值解法. *气象学报*, 1986, 44(4): 440~446
- 申亿铭. 云中催化剂的扩散. 北京: 气象出版社, 1994. 42~134
- 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. *气象学报*, 1998, 56(6): 708~723
- Yu Xing, Dai Jin, Jiang Weimei, et al. A three-dimensional model of transport and diffusion of seeding agents within stratus. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17(4): 617~635
- 余兴, 王晓玲, 戴进. 过冷层状云增雨播云有效区域的模拟研究. *气象学报*, 2002, 60(2): 205~214.

(2003-12-22 收稿, 2004-09-17 收修改稿)