

文章编号: 1006-4354 (2004) 03-0014-05

不同催化剂、核化率、播撒速率的数值试验

徐小红, 余 兴

(陕西省气象科学研究所, 陕西西安 710015)

摘 要: 以 2000-03-14 的飞机增雨为例, 设计不同催化剂、播撒率、核化率的播撒试验方案, 通过数值试验, 结合个例, 对比分析表明: 播撒率不变, 增大核化率, 投影面积、影响时段增加; 核化率不变, 播撒率越大, 投影面积越大。对于 An-26 飞机 AgI 发生器, 播撒率为 800 g/h, 核化率在 10^{13} 及以下时, 投影面积较小, 不利于增雨; 核化率为 10^{14} 时, 投影面积的极值为 $5\,325\text{ km}^2$, 影响时段为 120 min 以上, 120 min 以内面积的平均值为 $3\,245\text{ km}^2$, 有利于增雨。对于 Y-12 飞机 AgI 发生器, 播撒率为 600 g/h, 核化率在 5×10^{13} 及以下时, 不利于增雨; 核化率为 10^{14} 时, 面积极值为 $4\,590\text{ km}^2$, 影响时段在 120 min 以上, 120 min 以内面积的平均值为 $2\,905\text{ km}^2$, 利于增雨。对于液态二氧化碳, 核化率为 10^{12} , 播撒率达到 12 g/s 以上时, 增雨作用较好。

关键词: 增雨催化剂; 播撒率; 核化率; 投影面积; 数值试验

中图分类号: P481 **文献标识码:** A

催化剂作为人工增雨的关键作用因子, 其类型、播撒量及核化性能都会影响增雨的效果。在其他条件都符合增雨要求时, 从人工冰核浓度的角度来分析满足增雨要求的播撒方案怎样较为合理, 这对于指导播撒方案的设计, 减少催化的盲目性, 提高增雨效果有一定的意义。

目前, 人工增雨大多采用 AgI 催化剂, 而影响对象变化复杂, 随季节等因素的变化呈现不同的特点, 显然用同一种催化剂具有明显的局限性, 而且 AgI 价格昂贵, 因此选择一种或多种更适合的催化剂有一定的意义。美国犹他大学 Fukuta 教授研究的液态二氧化碳 (LC) 播云新技术, 在陕西春秋季的增雨作业中取得了较好的催化效果。本文选 AgI 和 LC 两种催化剂, 利用非均匀、非定常云中催化剂输送扩散的模拟系统^[1], 以 2000-03-14 的增雨作业实例为背景, 设计数值试验方案, 针对不同播撒率、核化率进行数值试验, 分析其对有效面积的影响, 以期为人工增雨作业提供量化参考。

1 数值试验

余兴等^[2]对 NOAA-14 极轨卫星资料与人工冰晶输送扩散模拟结果的对比表明, 模式能够反映出人工冰晶输送扩散的主要特征, 模拟结果也较为准确合理。故以 2000-03-14 增雨实例为个例, 在其他条件不变的前提下, 设计不同催化剂、核化率、播撒速率的数值试验方案, 讨论人工冰核浓度覆盖面积的变化。

2000-03-14, 陕西省人工影响天气中心在陕西关中与陕南地区组织了 1 次飞机人工增雨作业试验, 14:15 开始至 15:49 结束, 播云 94 min 耗 AgI 1 200 g, 播云高度 4.35 km、温度 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 云底高度 2.2 km、温度 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 云顶高度 4.5~5.0 km、温度约 $-13.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。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)。

收稿日期: 2004-02-06
作者简介: 徐小红 (1972-), 女, 河南鄆师人, 硕士, 从事人工影响天气研究。
基金项目: 国家科技部“西部开发科技行动”重大攻关项目 (2001BA901A41)

利用 3 月 14 日 08 时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。

考虑到催化剂输送扩散需要很细网格才能分辨出其特征, 取模式的水平范围为 $33^{\circ}30' \sim 35^{\circ}42' \text{ N}$, $106^{\circ}50' \sim 109^{\circ}30' \text{ E}$, 即 $250 \text{ km} \times 250 \text{ km}$, 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、GH 7 段, 共 66 min 耗 AgI 880 g , 播撒率 800 g/h , 取 -10°C 时 AgI 的核化率 5×10^{13} 。每 20 s 引入一个烟团, 66 min 共引入 198 个烟团。

2 试验设计

目前, 飞机增雨常用 An-26 飞机、Y-12 飞机, 利用机载 AgI 发生器播撒催化剂。陕西省人工影响天气中心 2001 年 11 月引进美国液态二氧化碳播云新技术后, 在陕西春秋季节作业中取得了较好的催化效果。结合作业实际情况, 以 3 月 14 日增雨实例为背景, 设计了三组试验方案。

第 1 组 An-26 飞机 AgI 发生器, 播撒率为 800 g/h , 核化率取 $10^{11}, 5 \times 10^{11}, 10^{12}, 5 \times 10^{12}, 10^{13}, 10^{14}$, 试验分别编号为: 1, 2, 3, 4, 5, 6。

第 2 组 Y-12 飞机 AgI 发生器, 播撒率为 600 g/h , 核化率取 $10^{11}, 5 \times 10^{11}, 10^{12}, 5 \times 10^{12}, 10^{13}, 5 \times 10^{13}, 10^{14}$, 试验分别编号为: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13。

第 3 组 液态二氧化碳 (LC) 核化率 10^{12} , 播撒率取 $5 \text{ g/s}, 8 \text{ g/s}, 12 \text{ g/s}, 15 \text{ g/s}, 20 \text{ g/s}$, 试验分别编号为: 14, 15, 16, 17, 18。

3 试验结果与分析

理论上, 要取得明显作用, 人工冰晶的浓度至少要与云体本底冰晶浓度相当, 一般要大 1 个数量级, 国内外对降水层状云冰晶浓度探测结果大多集中在 $10^0 \sim 10^1 \text{ L}^{-1}$ 范围内^[3]。另外, 参考文献 [2] 表明, 3 月 14 日增雨实例, 4 L^{-1} 浓度等值线外形与云沟相似。因此, 取地面投影浓度为 $10 \text{ L}^{-1}, 4 \text{ L}^{-1}, 1 \text{ L}^{-1}$ 3 种浓度值的数值试验面积结果进行分析, 并对 $10 \text{ L}^{-1}, 1 \text{ L}^{-1}$ 浓度的面积与 4 L^{-1} 的面积作比较。

3.1 第 1 组试验结果分析

表 1 是第 1 组试验得到的 AgI 地面垂直投影浓度分布的数值试验面积结果, 表中 t 、 S 表示时间、面积, S 的下标代表试验编号, 时间从 14:15 开始计算。

表 1 4 L^{-1} 浓度投影面积结果

t/min	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
S_1/km^2	13	11	11	9	8	6	0	0	0	0	0	0
S_2/km^2	35	46	46	41	39	37	17	0	0	0	0	0
S_3/km^2	53	77	70	70	69	63	44	0	0	0	0	0
S_4/km^2	127	231	413	442	334	378	309	151	1	0	0	0
S_5/km^2	159	336	611	807	959	800	761	564	290	65	0	0
S_6/km^2	219	531	1 093	1 727	2 475	3 304	4 078	4 632	5 014	5 227	5 325	5 309

由表 1 可见, 在同一时刻, 从试验 1—6, S 逐渐增大, 试验 6 增幅最大; 各试验 S 随时间变化呈单峰型; 从试验 1—6, S 极值逐渐增大, 达极值时间逐渐增长; 从试验 1—6, 影响时间逐渐增加, 试验 1 最短, 在 $10 \sim 70 \text{ min}$ 之间, 试验 6 影响时段最长, 达 120 min 以上; 试验 1—3, 在 80 min 以后, S 为 0, 试验 4, 5, 在 100 min 以后, S 为 0, 已无增雨作用。对比实例模拟结果^[2], 试验 1—5 的 S 小于实例结果, 试验 6 的 S 较大, 极值为 $5\,325 \text{ km}^2$ (110

min), 与实例比为 1.46, 在 120 min 内, S 的平均值为 $3\,245 \text{ km}^2$, 与实例比为 1.41。在核化率变化 1 个量级时, 取试验 5 与 6 对比, 5 的影响时段为 $0 \sim 100 \text{ min}$, S 的平均值为 535 km^2 , 与试验 6 的比为 0.16, 与实例的比为 0.23, 可见在核化率为 10^{13} 及以下时, S 较小, 不利于增雨。综上分析发现, 对于 An-26 飞机 AgI 发生器, 播撒率为 800 g/h 时, 增大核化率, 投影面积、影响时段增加; 核化率在 10^{13} 及以下, 投影面积较小, 不利于增雨, 这时可考虑更

换催化剂,或降低播云温度,或提高催化剂的核化性能。

由 10 L⁻¹浓度数值试验面积结果可见,面积的变化特征与浓度为 4 L⁻¹的一致,核化率越大,面积越大,达极值时间越晚;各试验 S 随时间变化呈单峰型;核化率越大,影响时间越长,试验 1 最短,在 10~70 min 之间,试验 6 影响时间最长,达 120 min 以上;试验 1~4,在 80 min 以后, S 为 0,试验 5,在 100 min 以后, S 为 0。与 4 L⁻¹浓度时的面积对比,取试验 6 为例。10 L⁻¹浓度, S 的极值为 3 132 km² (80 min), 120 min 内 S 的平均值为 1 917 km², 与 4 L⁻¹浓度的比分别为 0.59、0.59。

由 1 L⁻¹浓度数值试验面积结果可见,面积的

变化特征与浓度为 4 L⁻¹的一致,核化率越大,面积越大,达极值时间越晚;试验 1—5, S 随时间变化呈单峰型,试验 6,在模拟时间内 S 处于继续增长趋势;试验 1—2,在 80 min 以后, S 为 0,试验 3,在 90 min 以后, S 为 0,试验 4—6,影响时间在 120 min 以上。与 4 L⁻¹浓度时的面积对比,取试验 6 为例。10 L⁻¹浓度, S 的极值为 8 397 km² (120 min), 120 min 内 S 的平均值为 4 468 km²,与 4 L⁻¹浓度的比分别为 1.58、1.37。对比以上 3 种浓度下面积值,同一时刻,浓度越大,面积越小,符合扩散的基本规律;浓度越大,达极值时间越早。

3.2 第 2 组试验结果分析

表 2 是第 2 组试验的数值结果,表中各符号意义同表 1。

表 2 4 L⁻¹浓度投影面积结果

t/min	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
S_7/km^2	7	8	6	7	5	5	0	0	0	0	0	0
S_8/km^2	33	36	37	33	30	31	12	0	0	0	0	0
S_9/km^2	40	61	55	58	59	52	26	0	0	0	0	0
S_{10}/km^2	112	181	328	261	238	276	203	61	0	0	0	0
S_{11}/km^2	145	301	499	680	638	549	564	310	132	0	0	0
S_{12}/km^2	198	452	923	1 414	1 950	2 485	2 865	3 023	2 956	2 492	1 748	1 202
S_{13}/km^2	213	512	1 033	1 642	2 335	3 091	3 771	4 225	4 486	4 590	4 572	4 389

由表 2 发现,在同一时刻,从试验 7—13, S 逐渐增大,试验 13 增幅最大;试验 7—11,面积随时间的变化呈双峰型,12、13 为单峰型,这可能是由于人工冰晶浓度太低,扩散后达不到 4 L⁻¹,后又出现并和现象,造成双峰变化;从试验 7—13, S 极值逐渐增大,达极值时间逐渐增长;从试验 7—13,影响时间逐渐增加,试验 7 最短,在 10~70 min 之间,试验 13 影响时间最长,达 120 min 以上;试验 1,在 70 min 以后, S 为 0,试验 8、9,在 80 min 以后, S 为 0,试验 10,在 90 min 以后, S 为 0,试验 11,在 100 min 以后, S 为 0。与实例^[2]对比,试验 13 的 S 较大,试验 7—12 的 S 小于实例。在 120 min 以内,试验 13 的面积极值为 4 590 km² (100 min),与实例比为 1.26,120 min 以内 S 的平均值为 2 905 km²,与实例比为 1.26。在核化率变化 2 倍时,取试验 12 与 13 对

比,12 的影响时间达 120 min 以上,120 min 以内 S 的平均值为 1 809 km²,与试验 13 的比为 0.62,与实例的比为 0.78,可见在核化率为 5×10^{13} 及以下时, S 较小,可能不利于增雨。综上分析发现,对于 Y-12 飞机 AgI 发生器,播撒率为 600 g/h 时,增大核化率,投影面积、影响时间增加;核化率在 5×10^{13} 及以下,投影面积较小,不利于增雨,这时也可考虑更换催化剂,或降低播云温度,提高核化率。

由 10 L⁻¹浓度数值试验面积结果可见,面积的变化特征与浓度为 4 L⁻¹的一致,核化率越大,面积越大,达极值时间越晚;核化率越大,影响时间越长。与 4 L⁻¹浓度时的面积对比,取试验 13 为例。10 L⁻¹浓度, S 的极值为 2 589 km² (80 min), 120 min 内 S 的平均值为 1 463 km²,与 4 L⁻¹浓度的比分别为 0.56、0.50。

由 1 L^{-1} 浓度数值试验面积结果可见, 面积的变化特征与浓度为 4 L^{-1} 的一致, 核化率越大, 面积越大, 达极值时间越晚; 核化率越大, 影响时间越长, 试验 11、12、13 的影响时间在 120 min 以上; 试验 12、13 的 S 呈现继续上增趋势。与 4 L^{-1} 浓度时的面积对比, 取试验 13 为例。 10 L^{-1} 浓度, S 的极值为 $7\,869\text{ km}^2$ (120 min), 120 min 内 S 的平均值为 $4\,252\text{ km}^2$, 与 4 L^{-1} 浓度的比分别

为 1.71、1.46。对比以上 3 种浓度下面积值, 同一时刻, 浓度越大, 面积越小, 符合扩散的基本规律; 浓度越大, 达极值时间越早。

对比表 1 与表 2 可看出, 对于 AgI 催化剂, 核化率相同, 播撒率增大, 投影面积增大。

3.3 第 3 组试验结果分析

表 3 是第 3 组试验的数值结果, 表中各符号意义同表 1。

表 3 4 L^{-1} 浓度投影面积结果

t/min	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
S_{14}/km^2	186	421	816	1\,217	1\,589	1\,919	2\,127	1\,799	1\,290	950	509	208
S_{15}/km^2	195	452	916	1\,402	1\,921	2\,439	2\,796	2\,949	2\,844	2\,292	1\,609	1\,104
S_{16}/km^2	206	475	986	1\,542	2\,159	2\,816	3\,378	3\,671	3\,790	3\,761	3\,486	2\,869
S_{17}/km^2	212	494	1\,016	1\,615	2\,276	2\,996	3\,655	4\,057	4\,277	4\,335	4\,247	3\,999
S_{18}/km^2	217	527	1\,072	1\,695	2\,412	3\,218	3\,953	4\,495	4\,830	4\,994	5\,069	4\,993

由表 3 可见, 在同一时刻, 从试验 14—18, S 逐渐增大, 试验 18 增幅最大; 各试验 S 随时间变化呈单峰型; 从试验 14—18, S 极值逐渐增大, 达极值时间逐渐增长; 各试验影响时间都达到 120 min 以上。与实例^[2]对比, 试验 16、17、18 的 S 较大, 极值分别为 $3\,790\text{ km}^2$ (90 min)、 $4\,335\text{ km}^2$ (100 min)、 $5\,069\text{ km}^2$ (110 min), 与实例的比分别为 1.04、1.19、1.39, S 的平均值分别为 $2\,428\text{ km}^2$ 、 $2\,765\text{ km}^2$ 、 $3\,123\text{ km}^2$, 与实例的比分别为 1.05、1.20、1.36。取播撒率每秒相差 4 g 时, 试验 15 与 16 对比, 两试验的影响时间都达 120 min 以上, 试验 15 的 S 平均值为 $1\,743\text{ km}^2$, 与试验 16 的比为 0.71, 与实例的比为 0.75, 可见播撒率在 12 g/s 以下时, S 较小, 可能不利于增雨。综上分析发现, 对于液态二氧化碳, 核化率为 1012 时, 提高播撒率, 投影面积增加, 播撒率达到 12 g/s 以上时, 增雨作用较好。

由 10 L^{-1} 浓度数值试验面积结果可见, 播撒率越大, 面积越大, 达极值时间越晚; 各试验 S 随时间变化呈单峰型; 从试验 14—18, 影响时间逐渐增长, 试验 14 最短, 在 10~110 min 之间, 试验 15, 在 10~120 min 之间, 试验 16、17、18 达到 120 min 以上; 试验 14, 在 110 min 时, S 为 0, 试验 15, 在 120 min 时, S 为 0。与 4 L^{-1} 浓度时

的面积对比, 取试验 18 为例。 10 L^{-1} 浓度, S 的极值为 $2\,951\text{ km}^2$ (80 min), 120 min 内 S 的平均值为 $1\,744\text{ km}^2$, 与 4 L^{-1} 浓度的比分别为 0.58、0.56。

由 1 L^{-1} 浓度数值试验面积结果可见, 播撒率越大, 面积越大, 达极值时间越晚; 在模拟时间内, 各试验的 S 处于上增趋势; 各试验影响时间都在 120 min 以上。与 4 L^{-1} 浓度时的面积对比, 取试验 18 为例。 1 L^{-1} 浓度, S 的极值为 $8\,215\text{ km}^2$ (120 min), 120 min 内 S 的平均值为 $4\,389\text{ km}^2$, 与 4 L^{-1} 浓度的比分别为 1.62、1.41。对比 10、4、 1 L^{-1} 3 种浓度下面积值, 同一时刻, 浓度越大, 面积越小, 符合扩散的基本规律; 浓度越大, 达极值时间越早。

4 结论

4.1 对于三组试验的每一个试验, 都符合扩散的基本规律, 同一时刻, 浓度越大, 面积越小。

4.2 播撒率不变, 增大核化率, 投影面积、影响时段增加。核化率不变, 播撒率越大, 投影面积越大。

4.3 对于 An-26 飞机 AgI 发生器, 播撒率为 800 g/h 时, 核化率在 10^{13} 及以下时, 投影面积较小, 可能不利于增雨, 核化率为 10^{14} 时, 投影面积的极值为 $5\,325\text{ km}^2$, 影响时间达 120 min 以上,

120 min 以内面积的平均值为 3 245 km²；对于 Y-12 飞机 AgI 发生器，播撒率为 600 g/h，核化率在 5×10¹³ 及以下时，可能不利于增雨，核化率为 10¹⁴ 时，面积极值为 4 590 km²，影响时间达 120 min 以上，120 min 以内面积的平均值为 2 905 km²。

4.4 对于液态二氧化碳，核化率为 10¹²，播撒率达到 12 g/s 以上时，效果较好。对催化剂投影面积的分析研究，可为飞机增雨作业方案提供量化参考。数值试验表明液态二氧化碳作用较好，与 AgI 比较，价格低廉，建议层状云增雨作业可首选液态二氧化碳。同时，也应结合实际天气条件，考虑催化剂性能、发生器等因素，选择合适的催化

剂用量和播云温度。

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] 余 兴，戴 进，徐小红，等．飞机增雨 NOAA 卫星资料播云物理效应分析及有效性模拟研究 [A]．2003 年气象学会年会文集 [C]．北京：气象出版社，2003：11.

[3] 李大山，章澄昌，许焕斌，等．人工影响天气现状与展望 [M]．北京：气象出版社，2002：20.

用相同观测方法提高云量观测质量

云量是指云遮蔽天空视野的成数，分为总云量和单云量，日常工作中所记录的云量实质为观测员所看到的视云量。云量的观测全靠目力估计，观测员本身的主观成分大，加上云在不停地运动变化着，常常分布零散，形状不规则，给观测记录带来不少困难。不同的观测员，特别是不同的观测方法所观测的云量差别较大。所以云量的观测方法在相同条件下应尽量一致。

1 平移填补法观测云量

实际观测中，总云量常有几种云组成，由于云在天空分布零乱，采用平移云量的方法，进行天空空白云量填补，使总云量完整。再对天空等份分割，估计出总云量。对分散的单云量，也要用这种方法估算。这种估算云量法适用于零散分布的高云、中云和低云。

2 夜间云量的观测

夜间云的观测比较困难，要求观测员根据傍晚时的云状实况，结合当时影响本站的天气系统确定夜间云天变化趋势，观测前观测员在观测场内先使眼睛适应环境；观测时根据视觉，结合星光的疏密程度，以及伴见的天气现象，用平移法估计出云量(有条件的可结合实测云高判断云状、云量)。

3 天边云的观测记录

春季、夏季、秋季午后以测站为中心，在视区范围天边常常出现分散或孤立的 Cu (Cuhum、Fc、Cucong)，Aclent，Scug，Sclent；他们云状易于判定，但视云量难以确定。对这种云直接估计，往往使云量偏多，所以要用球带法观测。以观测者为圆心，以伸直的手臂为半径，以手指宽度为视宽度，沿水平视线旋转，当天边云的视宽度在 3~5°之间（相当于一手中间三指宽），视云量记“1”成；当视宽度不足 3°时视云量记“0”成；当视宽度大于 5°时视云量记“2”成。

4 稳定降水云层中 Cb 云的观测记录

夏半年常常在稳定降水云层 (Ns 或 As) 中突然出现雷暴，给云的观测记录常带来很大困难。这要求观测员要有系统的天气学理论知识，结合本站气象要素（气压、气温、降水量、相对湿度、风等）综合判断云状，记录云量。当响雷后，降水云层和降水性质都未发生变化（或有很小变化），仍记为 Ns 或 As；当响雷后，整个降水云层、降水性质和本站气象要素都发生了明显变化，这时本站记为“10”成 Cb。

(蒋海安)