

冷云飞机人工引晶检验*

王以琳¹⁾ 雷恒池²⁾

1) (山东省气象科学研究所, 济南 250031)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 分析了2000年春季在山东进行冷云飞机人工引晶试验中, 引晶前后云中微物理量的变化。观测结果显示, 引晶约5分钟后, 在引晶扩散带中可观测到过冷液态水消耗、冰雪晶浓度增加、云粒子谱拓宽的事实。分析表明, 这种与背景值存在巨大差异的物理变化是人工引晶的结果。

关键词: 冷云; 人工增雨; 效果检验

1 引言

在人工影响天气中, 人工增雨的效果检验一直是困扰我们的问题。随机化增雨作业在统计检验中能提供令人信服的检验结果, 国内外都有类似的例子。1961~1967年6.5个雨季以色列进行了第一次随机交叉试验, 其作业效果为总雨量增加15%, 1969~1975年6个雨季的第二次随机试验, 增雨量为13%^[1]。古田水库人工降水试验的效果统计分析表明增加日雨量24.7%^[2]。但国内以抗旱为主的飞机人工增雨中难实施随机化作业。为了从物理的角度提供飞机播云有效的证据, 泰国在1995~1998年进行的暖云催化随机试验中, 用两架飞机播云、探测云中引入氯化钙后的云粒子浓度和用雷达探测云的变化等方法检验播云效果^[3]。国内各省的飞机增雨作业大都采用统计检验方法检验作业效果。山东在进行了多年的飞机人工增雨作业后提出了用物理检验方法验证作业效果的要求。为此, 于2000年春季结合增雨作业进行了多次物理检验的试验。试验中用机载PMS粒子探测系统取得作业前后的云物理资料, 分析人工引晶后云粒子分布和演变, 以此证明人工引晶的有效性。

2 试验概况

2000年4~5月山东省气象科学研究所和中国科学院大气物理研究所在潍坊人工增雨基地进行了层状云飞机人工引晶试验, 试验期间在安-26飞机上安装了中国科学院大气物理研究所改装后的PMS粒子探测系统, 它包括FSSP、2D-C、2D-P探头和微机控

2001-11-19收到, 2002-04-17收到修改稿

*“十五”国家科技攻关重大计划项目2001BA610A-06和山东省气象局2002年重点课题“人工增雨作业潜力区的研究”共同资助

制系统，该系统在飞机内可实时显示云微物理量的数据和图像，以便实时决策是否作业。飞机的播云工具是两个碘化银发生器。飞机还装有 GPS 全球卫星定位系统，使播云航线和 PMS 资料得以精确配合。由于试验与抗旱作业同时进行，在试验方案设计时，为兼顾作业时间和作业面积等问题、为在飞机回穿播云航线形成的扩散带的过程中取到其中云物理资料、在不可能进行大规模试验的客观情况下，试验航线的设计遵循短时、同高度、小区域的原则，使播云后飞机尽快转回播云区探测云粒子的变化。下面分析这次试验的三个个例。

3 2000 年 4 月 18 日试验

2000 年 4 月 18 日 08 时山东地面处在辐合区内，鲁中山区 700 hPa (图略) 和 500 hPa (图 1a) 凝结率都较大，其中 500 hPa 凝结率为 12 mm h^{-1} 。700 hPa (图略) 和 500 hPa (图 1b) 水汽垂直输送为 $-20 \times 10^{-5} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。从上升速度输送的水汽和水汽凝结的条件看，在鲁中具备播云条件。根据与机场的气象、航行部门协商，决定在鲁东南进行作业，试验区选在诸城和胶南两个区域。

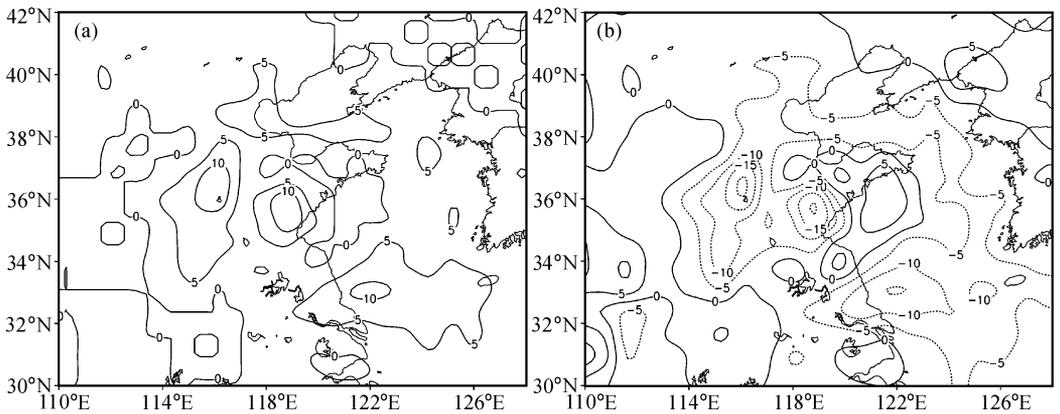


图 1 2000 年 4 月 18 日 500 hPa 凝结率 (a) 和水汽垂直输送 (b)

3.1 诸城试验区

图 2 是诸城试验区飞机播云和探测的航迹示意图。它表示飞机自 A 点经过 B (B1)、C 点后回穿播云航线，即经 B (B2)、D、E 点完成诸城试验区的试验 (飞机第一次经过 B 点记为 B1，第二次经过 B 点记为 B2)。整个飞行航线上飞机都在用碘化银发生器播云。由于播云和探测同时进行，飞机在 B2 前的探测可以认为是对播云前云层的探测，B2 以后的探测是对播云后云层的探测。碘化银

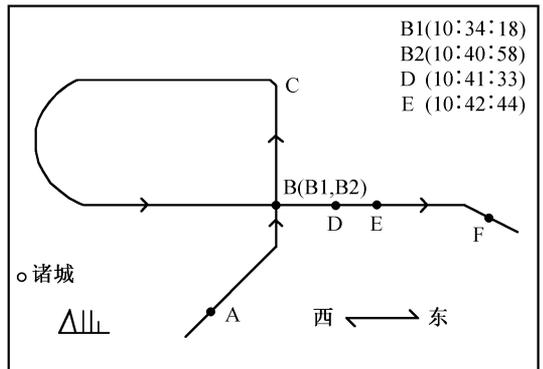


图 2 2000 年 4 月 18 日诸城飞机飞行航迹示意图

播撒率为 0.083 g s^{-1} , 飞机飞行高度 5000 m , 播云区飞机表温 $-7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (探空测温约 $-12.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 飞行环境风 270° 、 30.6 m s^{-1} 。在整个播云航线中, 考虑到飞机沿 A—C 航线播云后会在其东面形成一条南北向扩散带, 飞机沿 B2—E 航线穿越这条扩散带时可以测到引晶后云粒子的变化。图 2 表明, 飞机从 B (B1) 到 D 点的时间差为 435 s 。由于环境风速大, 如果主要考虑风的平流作用, 由 A—C 播云航线形成的催化剂扩散带, 经过 435 s 会向东平移 13311 m 。根据图 3 扩散带的宽度 D—E 点的时间差 71 s , 扩散带的宽度约 7881 m 。播云航线在 270° 、 30.6 m s^{-1} 环境风的作用下顺风扩散率约为 15.6 m s^{-1} , 这个扩散率数值偏大, 可能与环境风大、扩散带的边界模糊有关, 对于这个实际探测结果有待于进一步讨论。

图 3 是作业前后 2D-C 探头测到冰雪晶浓度随时间的变化曲线。从图 3 可以清楚的看到曲线 A—D 之间 ($10:33:01 \sim 10:41:32$) 和 E—F 之间 ($10:42:45 \sim 10:50:59$) 的冰雪晶浓度值都小于 $20\,000 \text{ 个 m}^{-3}$, 可以认为是云中冰晶浓度的背景值。曲线 D—E ($10:41:33 \sim 10:42:44$) 的冰晶浓度比背景值增加了约 4 倍, 最大值达 97600 个 m^{-3} 。由此可以看出, 这种量值的起伏超出了试验区范围内云中粒子浓度的正常起伏, 曲线本身的演变也明确表明这一点。因此, 可以认为图 3 中 D—E 的冰晶浓度值是人工引晶的结果。

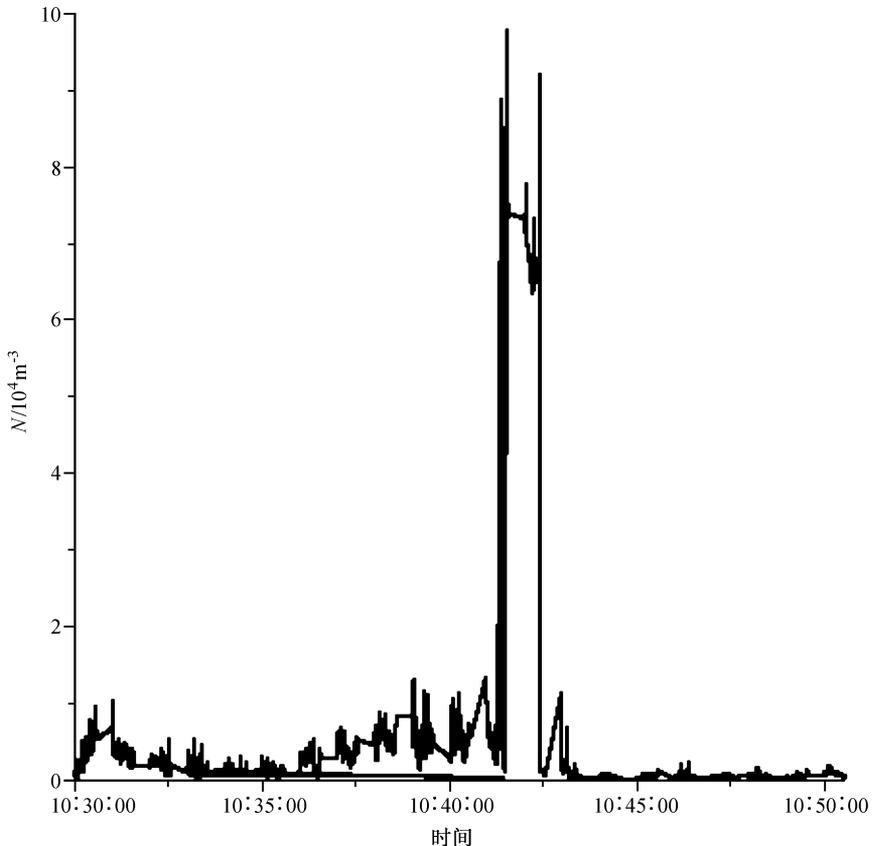


图 3 作业前后 2D-C 粒子浓度演变图

3.2 胶南试验区

图 4 是 2000 年 4 月 18 日飞机在胶南试验区作业的航迹示意图。飞机自 A 点进入胶南试验区向东南方向边播云边探测, 经 B (B1) 点飞行一圈再回到 B (B2) 点, 然后

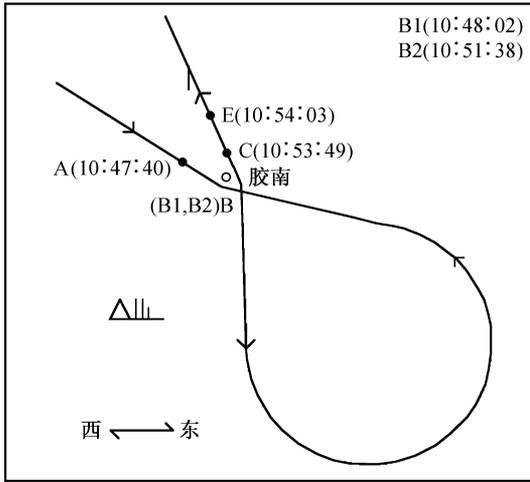


图 4 2000 年 4 月 18 日胶南飞机探测航迹示意图

后飞机向西北方向飞行, 飞机在 A—B1 航线上燃烧了碘化银丙酮溶液, 由于环境风速大, 如果主要考虑风的平流作用, A—B1 航线上播撒的碘化银在 270° 、 30.6 m s^{-1} 风的作用下向东平移, 会在其下风方形成的西北—东南向催化剂扩散带, 飞机从 A 飞到 C 的时间约 369 s, 所以扩散带距播云航线约 11291.4 m。当飞机第二次到达 B (B2) 点后向西北方向飞行, 穿越 A—B1 航线形成的播云扩散带, 并与扩散带相交于 C、E 两点。如用当时飞机地速计算, 扩散带的宽度约为 1204.6 m, 在上述环境风下的扩散率约为 3.2 m s^{-1} 。

2D-C 探头测到的冰雪晶浓度曲线见图 5。从图 5 可以清楚地看到 2D-C 粒子浓度曲线除 C—D—E 以外, 播云前后都小于 3000 个 m^{-3} 。如果把浓度小于 3000 个 m^{-3} 看作是云的背景值, 则曲线 C—D—E 点 (10:53:49~10:54:03) 的冰雪晶浓度显著高于背景值, 其中在曲线 D 点 (10:53:52) 冰雪晶浓度达到最大, 为 12100 个 m^{-3} , 比背景值增加了 3 倍多。对比整条曲线浓度的这种起伏, 可以认为 C—D—E 位于 A—B1 形成的扩散带中心部位。而图 5 中 B2 点的粒子浓度也较大, 但从曲线的演变看, 它的浓度值变化不大, 属云系中冰雪晶浓度的自然起伏。从图 4 和图 5 的引晶时间和冰粒子浓度的配合看, 图 5 C—D—E 冰粒子浓度的增加是人工引晶的结果。

图 6 是作业前后 2D-P 探头的探测结果。图中 D 点的雪晶浓度最大, 达 67400 个 m^{-3} 。C—D—E 冰雪晶浓度比其他曲线段的值大 3 倍多, 而且图 6 中 C—D—E 的时间与图 5 中 C—D—E 的时间基本一致。如果除去 2D-C 与 2D-P 两个探头重叠量程, 在图 6 的 C—D—E 中有 $800\sim 6400 \mu\text{m}$ 范围的雪晶或雪团存在, 综合图 5 和图 6, 可以看出在播云后形成的扩散带中有明显的 $25\sim 6400 \mu\text{m}$ 尺度的冰晶、雪晶甚至雪团存在, 它们大都是播云的产物。

图 7 是 FSSP 探头测得作业前后粒子谱的演变曲线。在飞机进入扩散带前 (10:50:01) 粒子谱窄, 它们分布在 $3.5\sim 15.5 \mu\text{m}$ 之间。在飞机进入引晶扩散带后, 10:53:55 云粒子浓度在 $3.5\sim 9.5 \mu\text{m}$ 段减少, 粒子谱展宽充满 FSSP 的整个量程。当飞机继续在扩散带中探测, 可能是飞到扩散带的边缘 (10:53:59), 粒子谱表现为所有谱段的浓度都减少且谱不连续, 冰粒子浓度的减少可能与其长大进入更大谱段有关。当飞机飞出扩散带后 (10:54:06), 粒子谱又呈现出与进入扩散带前相似的谱型。飞机穿过扩散带探头观测到粒子谱由窄变宽再逐渐变窄的演变特征。FSSP 探头在 $3.5\sim 15.5 \mu\text{m}$ 观测到的云粒子可能是液滴或云晶, 在人工引晶带中这一尺度云粒子的减少,

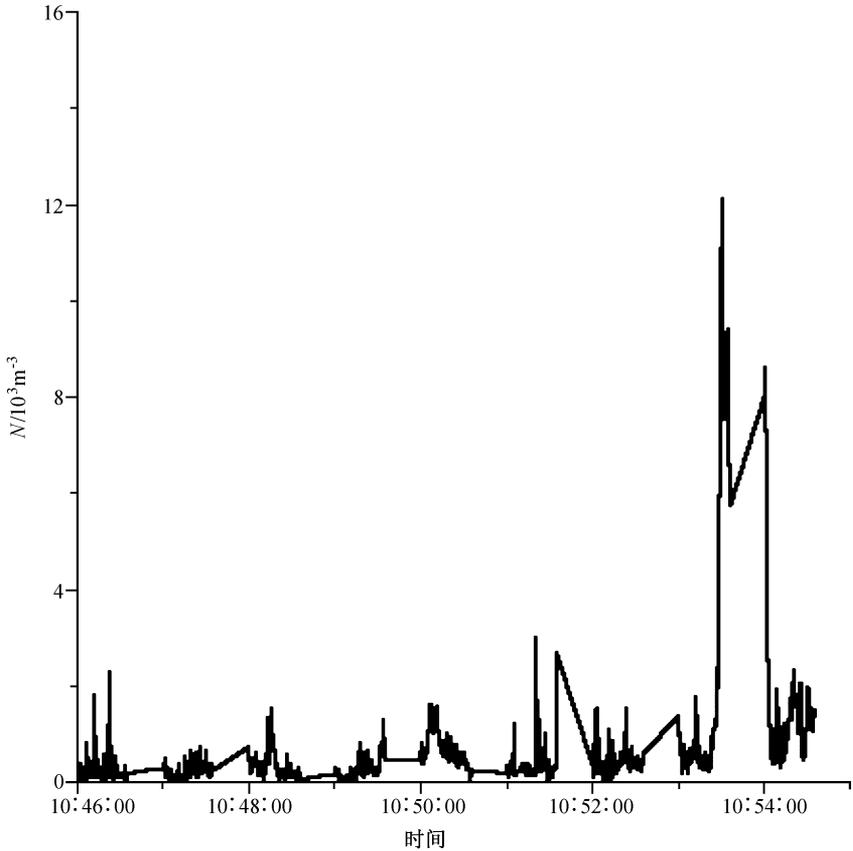


图5 作业前后 2D-C 粒子浓度演变图

可能是过冷液态水向冰晶上转移的结果。因为在 -12.4°C 的环境温度下, 如果冰面水汽压呈过饱和态, 蒸凝过程将进行得较快, 冰胚可以依靠消耗过冷却水而凝华长大成冰晶或雪晶, 使它们进入 2D-C 或 2D-P 测量尺度的范围。

在作业云中过冷水与冰相粒子共存, 假定冰相粒子为球状粒子, 则单个冰粒子凝华增长方程为

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{D}{\rho_i R_v T} (E_c - E_i),$$

式中 r 为冰粒子半径, D 为水汽扩散系数, ρ_i 为冰粒子密度, R_v 为水汽气体常数, T 为绝对温度, E_c 和 E_i 分别为平水面和平冰面饱和水汽压。若考虑过冷水滴很多, 冰粒子很少, 假定在凝华过程进行中, 温度不变。且水面和冰面饱和水汽压差 $\Delta E = E_c - E_i$ 不变, 对上式积分得,

$$t = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \frac{\rho_i R_v T}{D \Delta E},$$

t 为冰粒子从半径 r_1 凝华增长到 r_2 所需得时间。

若取 $\rho_i = 0.917 \text{ g cm}^{-3}$, $T = 261.15 \text{ K}$ (-12°C), $R_v = 4.6 \times 10^6 \text{ cm s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $\Delta E = 0.27 \text{ hPa}$, $D = 0.19 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 则冰粒子由 $r_1 = 7.5 \mu\text{m}$ 凝华增长到 $r_2 = 22.5 \mu\text{m}$ 所需要的时间为 $t \approx 48 \text{ s}$ 。

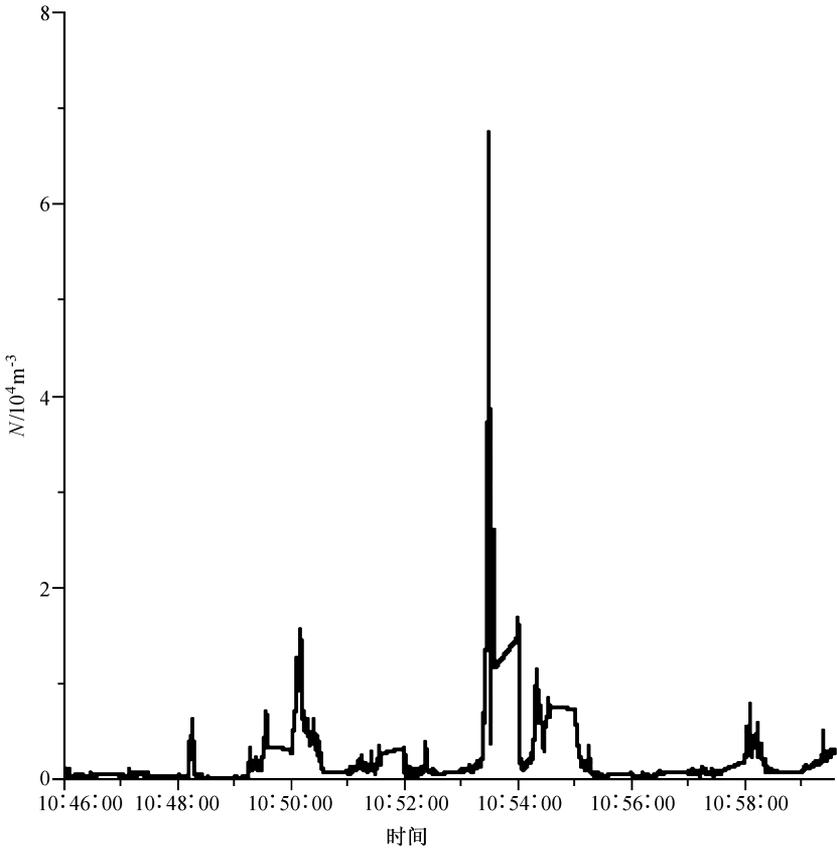


图 6 作业前后 2D-P 粒子浓度演变图

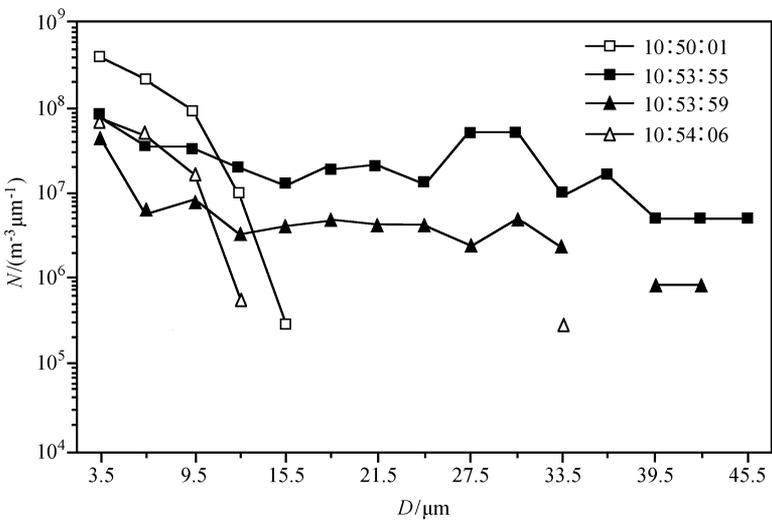


图 7 作业前后 FSSP 粒子谱变化图

若考虑到通风因子以及冰粒子所处的环境状况, $\Delta E = E_c - E_i$ 不可能始终保持那么高的饱和水汽压差。因此, 冰粒子凝华增长所需要的时间要更长一些, 但完全有可能

在 1~2 分钟内由直径 $15 \mu\text{m}$ 凝华增长到 $45 \mu\text{m}$ 。

在胶南试验区中, 引晶前后的粒子变化在表 1 中看得很清楚, 引晶后不仅 2D-C 冰雪晶浓度增加了一个量级, 2D-P 测到得雪花浓度也有一个量级的增加, 这些雪花主要是通过凝华增长和与背景雪花相互聚并形成的。

表 1 引晶前后粒子浓度

云系状态	飞行时间	2D-C 浓度/个 m^{-3}	2D-P 浓度/个 m^{-3}
引晶前	10:47:01	300	350
	10:51:10	1.21×10^3	1.15×10^3
	10:51:38	1.12×10^3	1.37×10^3
引晶后	10:53:49	8.80×10^3	5.00×10^4
	10:53:52	1.21×10^4	6.74×10^4
	10:54:03	5.96×10^3	1.51×10^4

4 2000 年 4 月 20 日试验

2000 年 4 月 20 日我们在济南附近进行了物理检验的试验, 图 8 是的播云探测航迹示意图。燃烧着碘化银丙酮溶液的飞机自 A 点进入试验区, 经 B (B1)、C、B (B2) 点后通过济南飞出试验区。在试验区内作业高度 4000 m, 飞机表温 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, 风向风速为 245° 、 19.4 m s^{-1} 。飞机两次过 B (B1、B2) 点的时间差为 312 s, 如果主要考虑风平流作用, A—B1 播云航线在风作用下形成的扩散带应位于 A—B1 航线的东侧, 即飞机穿越该扩散带的时间 (C 点) 应早于飞机第二次过 B 点的时间。这一点在图 9 的粒子浓度曲线上得到证实。

从图 9 上可以看到, 播云前 (A—B1) 2D-C 粒子浓度都小于 10900 个 m^{-3} , 可以看作是背景值。飞机在 B1 点作业后 283~284 s (C—D), 即时间 09:33:57~09:33:58 粒子浓度猛增到 66000 和 74100 个 m^{-3} , 约是播云前云系粒子浓度背景值的 6.8 倍。图 9 中 F 点的冰粒子浓度也较大为 15800 个 m^{-3} , 但远低于 C—D 的浓度, 与 A—B1 相比属云粒子的自然起伏。

由于上升气流、凝华潜热的释放和冰雪晶下落速度不同, 使得播云扩散带的垂直分布不均匀。由机载 GPS 资料可知, 飞机在 09:22:02~09:29:14 (在 B1 以前) 飞行时, 播云高度在 $3986.6 \sim 3938.8 \text{ m}$ 之间波动, 飞机在 C 点前后 (09:32:34~09:34:50) 飞行探测高度为 3953.3 m 。可能由于探测和播云高度上的差异, 使飞机在探测播云效果时飞到扩散带垂直分布浓度很低的高度上而没有探测到冰晶浓

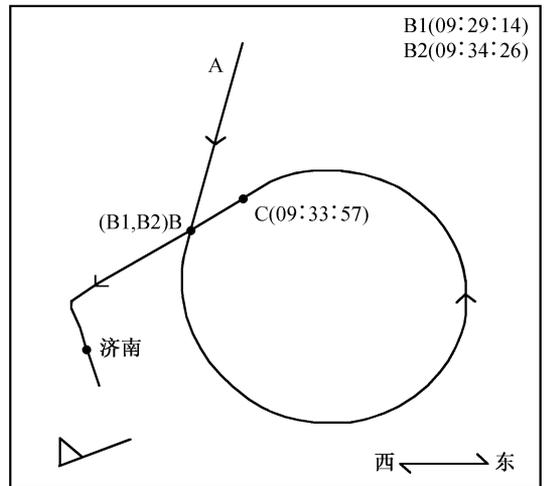


图 8 2000 年 4 月 20 日飞机在济南探测航迹示意图

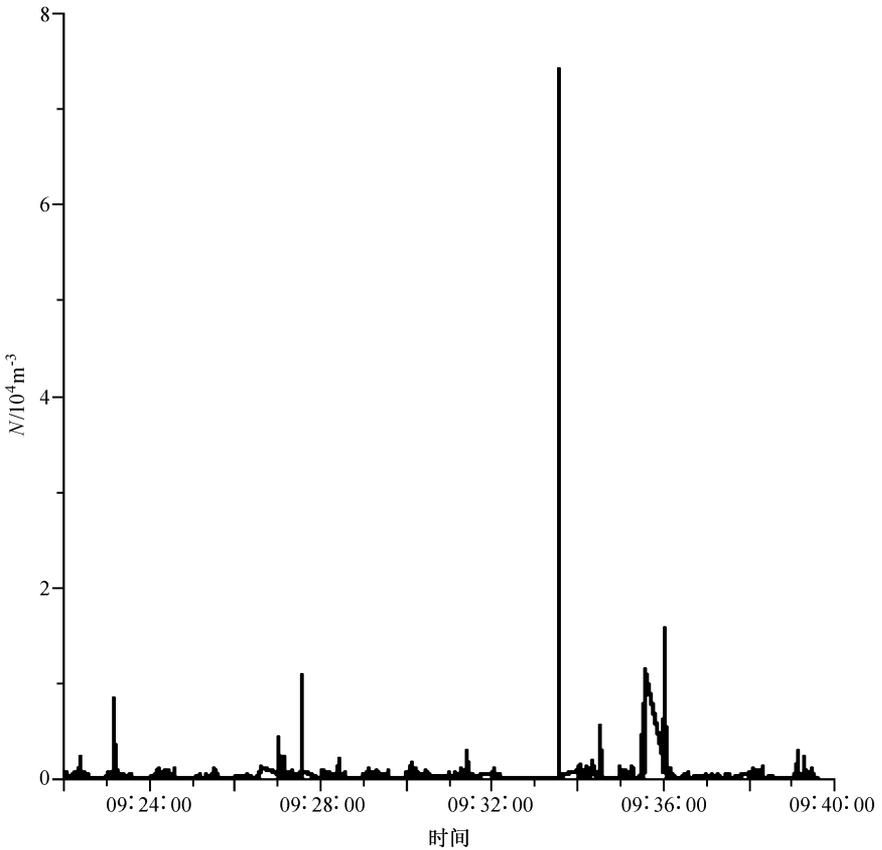


图9 作业前后 2D-C 粒子浓度演变图

度较大的层次，因而图 9 中出现了飞机在扩散带中只飞行了两秒钟，探测到扩散带特别窄的现象。但分析图 8 和图 9 的时间和冰雪晶浓度，可以认为 C—D 的冰晶浓度值是云中燃烧碘化银丙酮溶液的结果。

5 试验区云粒子变异系数

试验区云系内云粒子浓度有一定的起伏，有专家用云滴浓度起伏强度表示其变化^[4,5]。为了反映播云前后冰雪晶浓度的差异，我们采用变异系数 C_v ^[6] 表示其浓度起伏强度：

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}},$$

式中 S 为云粒子浓度的标准差， \bar{x} 为云粒子平均浓度。 C_v 越大表示粒子样本中的浓度变化越大。表 2 给出了三个试验区催化剂扩散带内外变异系数的数值。从表 2 可

表 2 三个试验区变异系数的对比

试验区	曲线起始点	变异系数 C_v
诸城 (2D-C)	图 3 中 A—F	2.739
	图 3A—F 中去掉 D—E	1.122
胶南 (2D-C)	图 4b 中 A—F	2.031
	图 4b A—F 中去掉 D—E	1.031
胶南 (2D-P)	图 5 中 A—F	2.343
	图 5 A—F 中去掉 D—E	1.402
济南 (2D-C)	图 7 中 A—G	6.463
	图 7 A—G 中去掉 C—D	2.991

知, 包含扩散区粒子浓度曲线的变异系数明显大于去掉扩散区粒子浓度后其粒子浓度的变异系数。粒子浓度的起伏强度的增大可以认为是扩散带存在而引起的, 这是播云的结果。

6 小结

(1) 从 PMS 粒子探测系统得到的资料看, 一架飞机进行物理检验时探测的区域不宜过大, 时间不宜过长。否则由于环境风场、冰晶增长速度和落速、扩散规律等因素的复杂性可能在飞机回穿时很难找到播云的扩散区。

(2) 从分析不同的个例知, 层状云冰雪晶的背景浓度差异比较大, 过冷云区内云晶和冰雪晶共存, 播云约 5 分钟后, 在播云下风方会形成一条引晶扩散带。在引晶扩散带中可以观测到冰雪晶浓度增加和粒子谱逐渐展宽的事实。云粒子尺度的增长消耗了扩散带中的过冷液态水。这种微物理量的变化是人工引晶的结果。

(3) 从三次飞机人工引晶的物理检验结果看, 人工引晶是有效的。今后应进一步扩大试验的检验。

致谢: 山东省气象科学研究所和中国科学院大气物理研究所的部分同志参加了试验, 龚佃利参加了部分图的绘制。

参 考 文 献

- 1 Gagin, A., and J. Neumann, The Second Israeli Randomized Cloud Seeding Experiment: Evaluation of the results, *J. Appl. Meteor.*, 1981, **20**, 1301~1331.
- 2 福建省气象局气科所、南京大学气象系, 古田水库地区人工降水试验效果统计分析, *大气科学*, 1979, **3** (2), 131~140.
- 3 Bernard, A. Silverman, Roy Rasmussen and Wathana Sukarnjanaset, The Thailand Warm Cloud Seeding Experiment: 3. Physical Support for the Experimental Results, Seventh WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMP Report No. 31. 1999 (1), 13~16.
- 4 顾震潮, 我国云雾降水微物理特征问题, 北京: 科学出版社, 1962, 1~21, 36~63.
- 5 许焕斌, 衡山云雾微结构起伏的初步观测试验, *气象学报*, 1964, **34**, 539~547.
- 6 叶家东、范蓓芬, 人工影响天气的统计数学方法, 北京: 科学出版社, 1982, 106pp.

Test of Cold Cloud Seeding

Wang Yilin¹⁾, and Lei Hengchi²⁾

1) (*Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031*)

2) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract Cold cloud seeding was tested in Shandong Province in spring of 2000. In the test the Particle Detect System (PMS) and the Global Position System (GPS) were used on the airplane. The change of the cloud parameter in the test of cold cloud seeding is analyzed. After 5 minutes it was found that the liquid water was decreased, the ice crystal density was increased, and the particle size distribution was widened in diffuse zone. The differences of the physical change in comparison with the background concentration are the result of the artificial precipitation.

Key words: cold cloud; artificial precipitation; effect evaluation

勘 误

2003年(27卷)第4期784页,图12的图题“1997~1999年……”应改为“1977~1999年……”。