

液态 CO₂ 人工引晶后云微物理和降水变化的观测分析

金德镇¹ 雷恒池² 郑娇恒¹ 肖辉² 崔莲¹ 吴玉霞² 刘健¹

¹ 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062

² 云降水物理与强风暴实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 根据飞机探测仪器观测到的云中粒子微观结构, 结合卫星、雷达和常规天气资料, 分析了人工增雨作业前后云的宏、微观物理结构和降水变化。结果表明, 作业后影响区云中的冰晶浓度、雨滴直径对比区有明显增加, 云中过冷水减少; 对比区降水回波强度和强回波区面积变化不大, 而影响区最大回波强度增大, 强回波区的面积扩大, 降水增加。这与影响区云中降水粒子增多、直径增大是一致的, 这些结果说明了液态 CO₂ 催化层状云的物理响应。

关键词 综合观测 液态 CO₂ (LC) 人工引晶 云微物理特征

文章编号 1006-9895 (2007) 01-0099-10

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

Observation Research on Cloud Microphysics and Precipitation Affection of Stratiform Cloud Seeding by Liquid Carbon Dioxide

JIN De-Zhen¹, LEI Heng-Chi², ZHENG Jiao-Heng¹, XIAO Hui²,
CUI Lian¹, WU Yu-Xia², and LIU Jian¹

¹ Weather Modification Office of Jilin Province, Changchun 130062

² Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The detail information is deduced on the microphysical affection of stratiform cloud seeding, including in situ aircraft measurements, radiosondes, radar data, and surface observations in the experiment of precipitation enhancement in Jilin Province during 11–12 July 2002. The results indicate that the maximum of cloud super cooled liquid water content reaches 0.1–0.2 g/m³, but the concentration of ice crystal is very low for nature cloud. It means that the cloud is eligible for precipitation enhancement seeding according to principle of weather modification. The changes of cloud microphysical structure, such as the increasing of ice crystal concentration and diameter of rain droplets, the decreasing of super cooled liquid water content, are caused by seeding liquid CO₂. The increase in radar echo intensity in the incidence area comparing with the target area is also caused by cloud seeding, which is similar to the increase in concentration of rain droplets observed by in situ aircraft. For the precipitation intensity in the incidence area of cloud seeding increases but it only slightly changes in the comparison area. The redistribution of rainfall is caused by cloud seeding in the precipitation area.

Key words in situ aircraft observation, liquid carbon dioxide, cloud seeding, structure of cloud microphysics

收稿日期 2005-11-17, 2006-06-07 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-225, 国家自然科学基金资助项目 40175003、40275002

作者简介 金德镇, 男, 1956 年出生, 学士, 正研级高级工程师, 主要从事大气物理、大气化学和环境科学研究工作。

E-mail: zhangjh8070@163.com

1 引言

碘化银(AgI)是目前国内外人工增雨试验和作业中常用的催化剂,在温度较低时($T < -15^{\circ}\text{C}$),AgI的冰晶成核率很高,但在温度处于 $0 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 的冷云中,AgI成核率非常低。实际观测表明,在该温度区间内过冷水含量明显比其高度以上更低温度区($-5 \sim -20^{\circ}\text{C}$)的值高。若能在 $0 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 区中作业对人工增雨将很有利。研究表明,采用制冷剂固态或液态 CO_2 为催化剂,可能突破上述AgI催化时的温度限制从而提高催化效果。Schaefer^[1]用固态 CO_2 进行人工降水、人工消雾取得了成功。Fukuta^[2]提出了液态 CO_2 (简称LC)成冰技术,分析了其在过冷云中的作用原理,并在日本进行了野外人工增雨试验^[3]。喷撒的LC可使局部温度降到 -90°C ,只要温度低于 0°C ,LC产生的冰晶量基本是一个常数。吉林省人工影响天气联合开放实验室设计了一套飞机上使用的高压喷洒LC的技术装备^①。2002年4~7月,吉林省人工影响天气联合开放实验室与中国科学院大气物理研究所合作,在吉林省开展了使用LC进行人工增雨作业实验,采用了这套催化技术,并相应开展了飞机和雷达等综合观测,以观测研究这种催化方法所起的物理作用和效果。综合试验观测以中国科学院大气物理研究所的机载粒子测量系统(简称PMS)观测为主,采用3个不同的探头,测量粒子包括小云滴、大云滴、雨滴、冰晶、雪花等云粒子,尺度范围从 $0.5 \sim 6400 \mu\text{m}$,配以雷达、卫星探测,分析作业前后影响区云中微物理量、过冷水以及地面降水的变化。本文以2002年7月11日综合试验观测为例,主要分析LC人工引晶后云微物理变化及对降水的影响。

2 天气背景和催化方案

2002年7月11日08时(北京时,下同)850 hPa形势图上,低涡中心位于齐齐哈尔附近(47°N , 123°E),乌兰巴托附近有一冷舌;试验区位于涡旋底部的西南气流中,在日本海附近还有一涡旋中心(图略);500 hPa形势图上,东亚处在长波槽中,低

涡中心位置偏北,落后于低空低涡,700 hPa满州里附近有位势高度为296 hPa的低涡(图1),涡旋后部有冷空气配合。

2002年7月11日10时卫星云图上,东北地区为一明显的涡旋云系复盖,涡旋中心在蒙古境内,吉林省处在涡旋云系的东南象限,即涡旋云系尾部较均匀的层状云中(图2);11时到13时,涡旋中心稳定少动,涡旋尾部云系略向东北移动。

2002年7月11日08时长春站探空显示(图略),600~500 hPa(4~5 km)为弱不稳定层,其他

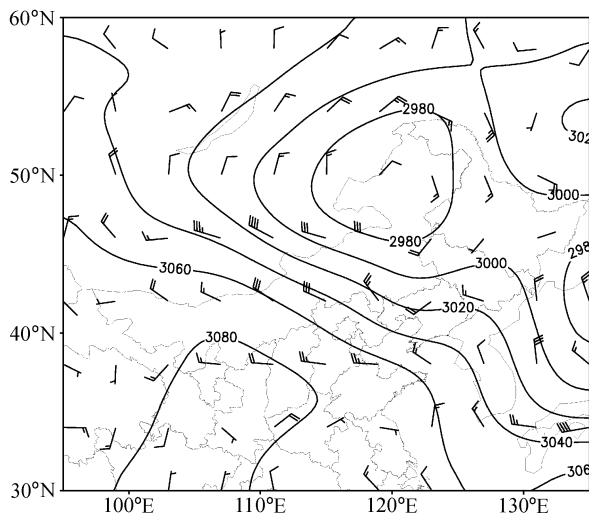


图1 2002年7月11日08时700 hPa形势

Fig. 1 Weather chart at 700 hPa at 0800 LST 11 Jul 2002

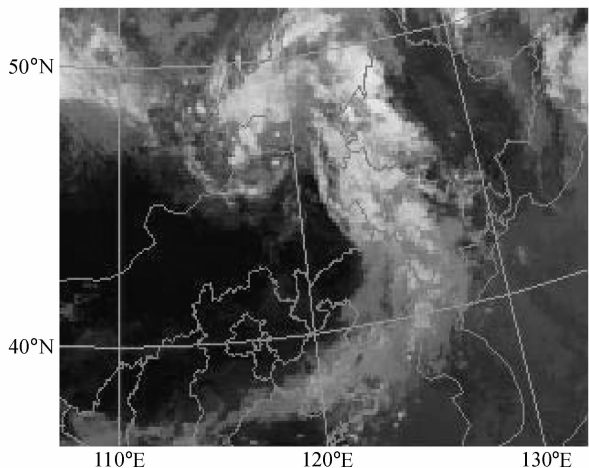


图2 2002年7月11日10时红外卫星云图

Fig. 2 Infrared satellite image at 1000 LST 11 Jul 2002

① 金德镇等. 液态干冰(LC)催化剂、催化装备、催化技术及效果的进一步研究. “人工增雨技术研究及示范”课题2002年度论文摘要. 北京, 2002

层为中性或稳定, 850 hPa 以下为西南风, 以上为偏西北风; 地面观测表明该地上空为高层云 (As) 和碎积云 (Fc), 低云云底高 600 m。同一时刻位于长春西南的沈阳和东部的临江两站探空资料表明, 均为稳定大气层结, 而位于长春西北的通辽探空则整层不稳定。降水系统首先在长春西北地区形成, 松原雷达站 08 时观测到西北到西有零星对流云, 而其他部位的云系为层状云。

探测飞机为国产 Y-12 型飞机, 航速为 252 km/h, 最大爬升高度 7 km, 飞机上安装机载 FSSP-100、2D-C、2D-P 云物理测量仪器以及 GPS 全球定位系统, 观测仪器能连续实时记录观测结果, 根据 GPS 全球定位系统观测记录, 可确定出 PMS 探测的云粒子时空位置。

图 3 给出了本次综合试验航迹图, 用数字标出穿行的顺序, 为了清楚起见, 还给出局部放大图。飞机于 10:30 起飞, 11:21 在 A 点 (高度 5100 m) 开始做锯齿形飞行增雨作业; 12:03 停止人工增雨作业 (F 点) 后, 先在 5100 m 高度上垂直于 EF 航线做“8”字形穿越探测飞行, 然后分别在 5700 m、4700 m、3500 m、2100 m 左右高度作垂直于 EF 航线的飞行探测, 每个高度飞行约 8~10 min, 飞行探测试验于 13:15 左右完成, 整个试验飞行大约经历了 3 小时。试验区位于长春西南方向的双辽、四平、怀德境内, 催化剂为液态二氧化碳 (LC), 共播

撒了 40 kg, 播撒速率约为 11.4 g/s。

试验区的云系为涡旋云系尾部的稳定层状云, 试验飞行中宏观观测到飞机机翼有较厚结冰, 表明试验区高空有过冷水存在。播云作业高度 5100 m 左右, 对应的温度约 -5.2℃, 0℃ 层高度为 4.5 km。

3 对比区与影响区的确定

试验时高空风向为偏西风, 增雨作业后形成一条东北西南向的人工引晶带, 它一边扩散, 一边向其下风方向平移, 飞机沿下一条航线穿越这条扩散带进行探测和作业时, 可探测到云中降水粒子因受作业影响而发生的变化, 同时又形成了另一条人工引晶扩散带并向其下风方平移。将没有受到作业影响的探测区定为背景区或对比区, 受播云影响的探测区称作影响区。考虑到试验区位于长春和沈阳之间, 鉴于 7 月 11 日 500 hPa (5 km 左右) 长春风向为 290° 和沈阳风向为 260° 的实际情况, 影响区选取在作业区的偏东方向。在图 3 中点 A 到 B 的探测区 (对应 11:22~11:26 飞行的区域) 未受催化影响, 为对比区; 从 C 到 D 点 (11:28~11:32 飞行的区域) 为影响区。为简述方便, 将这一时段的对比区和影响区简称为第一时段试验区。同理, 图 3 的 EF512 探测中, 从 E 到 F 点 (11:57~12:02 飞行的区域) 为对比区, 从“5”点到“1”、“2”点则为影

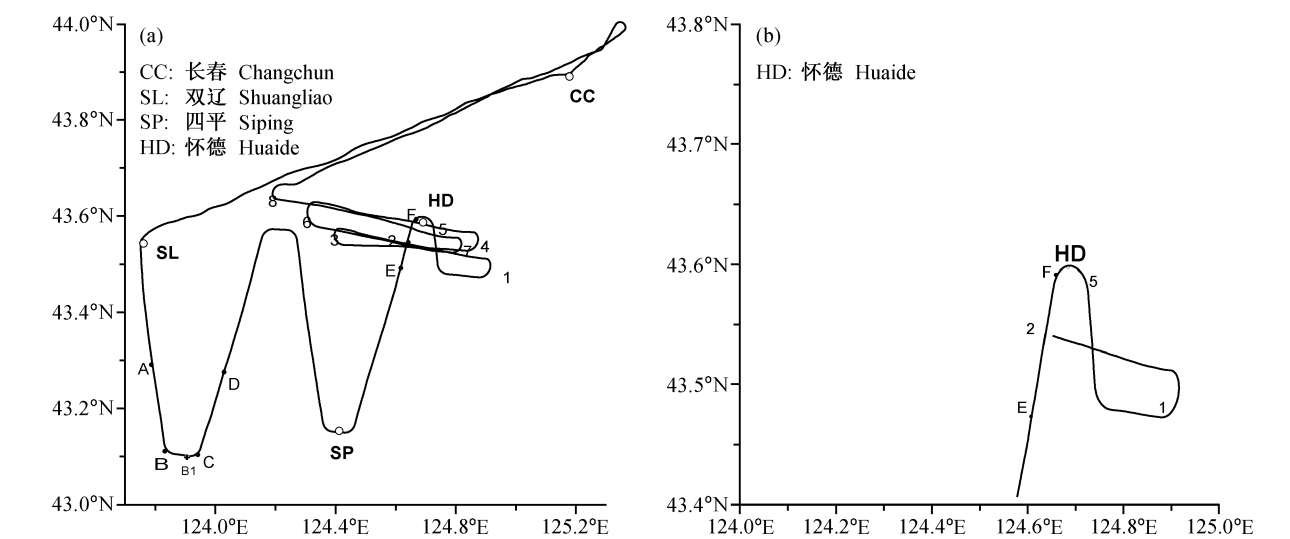


图 3 2002 年 7 月 11 日吉林省综合试验飞行路径示意图: (a) 全程飞行轨迹; (b) 催化播撒区域局部放大图

Fig. 3 Flight trajectory in the Jilin comprehensive experiment on 11 Jul 2002; (a) Total flight trajectory; (b) amplifying chart in the local seeding area

响区, 对应 12:04~12:15 飞行的区域, 将这一时段的对比区和影响区简称为第 2 时段试验区。

4 人工引晶综合试验结果

4.1 人工引晶后云微物理量(云粒子和雨滴)的变化

一般以 300 μm 为冰晶与雪晶的分界线, 把 2D-C 探头观测到的云粒子分为直径小于 300 μm 和大于 300 μm 两档。直径小于 300 μm 的粒子中包括大云滴和冰晶, 直径大于 300 μm 的粒子中包括小雨滴、雪晶和冰晶聚合体。表 1 给出了两个时段对比区和影响区云微物理量(云粒子和雨滴)的平均变化情况。在第一时段试验区, 直径小于 300 μm 冰晶浓度由对比区的 6879 个/ m^3 增加到 12846 个/ m^3 , 增加了 81%; 第二时段试验区, 直径小于 300 μm 冰晶浓度由对比区的 15226 个/ m^3 增加到 36849 个/ m^3 , 增加了 140%。作业后两个时段影响区 2D-C 探头观测到的大粒子浓度(大云滴和冰雪晶)比其对应的对比区的浓度有所增加, 增加了约 0.6~1.4 倍, 其所在高度温度约 -5°C 左右, 探测到的粒子主要是冰晶, 所以大粒子浓度的增加主要是冰雪晶增加, 影响区冰雪晶增加应该是播撒 LC 后人工引晶的结果。冷云人工增雨是通过 Bergeron 过程, 加速过冷云滴向冰晶转化, 冰晶长大形成降水元, 提高降水效率。由于冰晶浓度增多, 冰晶通过凝华、聚并增长, 长大成霰或雪晶。表 1 中影响区直径大于 300 μm 的雪晶、冰晶聚合

体以及 2D-P 探头在影响区观测到的降水粒子的浓度均比对比区增加了约 50% 以上, 降水粒子含水量也相应增加。这表明人工增雨作业后, 云中降水粒子浓度增多, 降水粒子尺度增大了, 促进了降水过程的发展。

赵柏林等^[4]曾研究过降水云系中冰水转化问题。在含水量为 0.1 g/m^3 的情况下, 需要的冰晶浓度要达到 125 个/L, 才能使降水效率达到最大。从表 1 可知, 虽然对比区的最大含水量达到 0.1~0.2 g/m^3 , 但是冰晶浓度较低, 一般为每升几个到十几个, 比 125 个/L 相差甚远, 说明该试验区上方的云系还有较大的引晶催化潜力, 在云系中适当增加冰晶量, 可提高降水云系中冰水转化率, 增加降水效率。

图 4a 和 b 是 2D-C 探头分别在第一时段和第二时段观测到的大云滴和冰雪晶浓度的演变情况, 从图中可以看出, 第一时段对比区(对应 11:21~11:26), 自然状态大粒子浓度较低, 大云滴和冰雪晶浓度最大值小于 10 个/L, 约 6~8 分钟后, 在影响区(11:28~11:32)粒子浓度较高, 起伏较大, 最大值约 60 个/L; 第二时段试验区也有同样的结果, 影响区大云滴和冰雪晶浓度对比区增大 1 个量级。

2D-P 探头在两个时段试验区探测有相似的结果。降水粒子(雨滴和冰雪晶)浓度高的地方, 正是大云滴和冰雪晶浓度高的地方, 但是降水粒子浓度增大在时间上略微落后于 2D-C 探头探测的大云

表 1 对比区和影响区大粒子(云滴和雪晶)特征分布
Table 1 Particles (cloud and snow) distribution in the contrast area and the seeding effect area

		第一时段 The first period of time		第二时段 The second period of time	
		A: 11:20 - 11:26	B: 11:28 - 11:32	A: 11:57 - 12:01	B: 12:03 - 12:06
2D-C	总浓度 Total number concentration	7514 / m^3	14533 / m^3	16487 / m^3	49589 / m^3
	总含水量 Total water content	0.036 g/m^3	0.085 g/m^3	0.071 g/m^3	0.216 g/m^3
	<300 μm 浓度 Number concentra- tion with diameter <300 μm	6879 / m^3	12846 / m^3	15100 / m^3	46631 / m^3
	>300 μm 浓度 Number concentra- tion with diameter >300 μm	635 / m^3	1680 / m^3	1370 / m^3	2954 / m^3
	<300 μm 含水量 Water content with diameter <300 μm	0.014 g/m^3	0.0322 g/m^3	0.038 g/m^3	0.126 g/m^3
	>300 μm 含水量 Water content with diameter>300 μm	0.022 g/m^3	0.053 g/m^3	0.032 g/m^3	0.021 g/m^3
2D-P	总浓度 Total number concentration	752 / m^3	1162 / m^3	418 / m^3	951 / m^3
	总含水量 Total water content	0.058 g/m^3	0.093 g/m^3	0.777 g/m^3	2.390 g/m^3

注 Note: A: 对比区 Contrast area; B: 影响区 Effect area

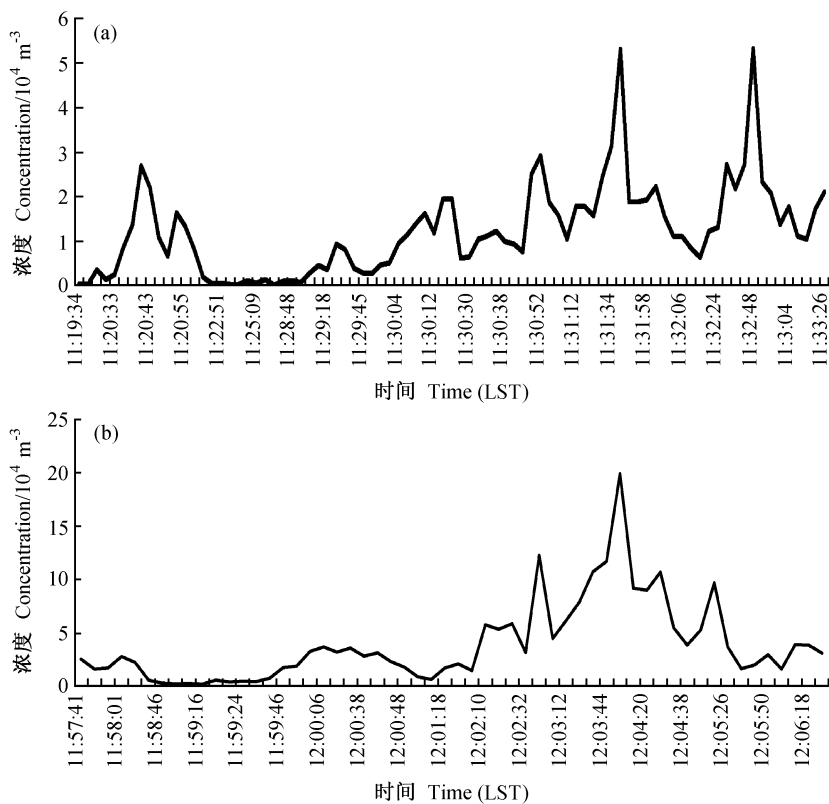


图 4 2002 年 7 月 11 日两个时段试验区探测 (2D-C 探头) 路径上降水粒子 (大云滴和雪晶) 随时间变化: (a) 第一时段; (b) 第二时段
Fig. 4 Time series of precipitation particles (cloud and snow) measured by 2D-C probe in the experiment area on 11 Jul 2002: (a) The first period of time; (b) the second period of time

滴和冰雪晶的时间, 这表明降水粒子的增大与大云滴和冰雪晶浓度增多相关。

为了更详细地讨论人工引晶后云中粒子的变化, 表 2、表 3 给出了两个时段试验区的对比区和影响区降水质点二维图像样本的取样高度(H)、温度(T)、浓度、峰值直径以及最大直径等各种信息。为了更直观地说明催化前后云粒子的响应, 图 5 给出了与表 2、表 3 相同时段的探头观测到的云粒子二维图像样本。为了有可比性, 对比区和影响区都选取浓度最大时刻的样本。图 5a 和表 2 中 1、2 号样本为 2D-C 探头在对比区取得的大云滴和冰雪晶, 取样时间分别为 11:24:40 和 11:25:18, 取样高度分别为 5156 m 和 5162 m, 所在高度对应的温度 -5.2°C 左右, 大云滴和冰雪晶浓度在 $1093\sim1326\text{ 个}/\text{m}^3$ 之间, 最大粒子直径为 $450\text{ }\mu\text{m}$, 峰值直径 $200\text{ }\mu\text{m}$, 粒子形态以霰为主; 3、4 号样本 2D-C 探头取到的是在影响区取得的样本, 取样时间分别为 11:31:28、11:32:36, 取样高度、温度和对比

区基本相同, 时间后延了 $8\sim13\text{ min}$ 左右, 在这两样本中大云滴和冰雪晶浓度达 $24539\sim27192\text{ 个}/\text{m}^3$, 对比比区浓度增加了 1 个量级, 粒子形态以小冰晶为主, 峰值直径为 $150\text{ }\mu\text{m}$, 比作业前减少了 $50\text{ }\mu\text{m}$, 说明有小粒子生成。

图 5b 和表 3 中 1、2 号是 2D-C 探头在对比区取得的, 取样时间分别为 11:59:58、12:00:12, 取样高度分别为 5212 m、5222 m, 对应温度 -5.3°C 左右, 粒子浓度在 $32940\sim32354\text{ 个}/\text{m}^3$ 之间, 最大粒子直径为 $550\text{ }\mu\text{m}$, 峰值直径 $200\text{ }\mu\text{m}$; 3 号和 4 号样本是 12:04:00 和 12:04:38 在影响区取得的, 粒子浓度为 $107156\sim210067\text{ 个}/\text{m}^3$, 峰值直径为 $100\sim150\text{ }\mu\text{m}$ 。与对比区相比, 粒子浓度增加了一个量级, 峰值直径减少, 影响区粒子峰值直径减小而浓度增多, 说明增加的粒子主要为小粒子 (云滴和冰晶), 而小粒子在 5000 m 高度上主要是冰晶。对照 1992 年 Asuma 等^[5]在日本海若峡湾 (Wakasa) 观测总结得到的不同降水粒子的典型图像, 判断这些

小粒子主要为针状冰晶和霰，冰晶和霰浓度增加，应是人工引晶引起的。

图 5 也给出了与表 2、表 3 相同时段的探头观

表 2 第一时段试验区作业前后云雨粒子变化
Table 2 Characteristics of cloud particles in the first period of time in the experiment area

仪器	样本					
Instrument	Sample	H/m	T/°C	N_t/m^{-3}	P_{dm}/mm	D_m/mm
2D-C	1	5151	−5.2	1093	0.20	0.45
	2	5153	−5.2	1326	0.20	0.45
	3	5156	−5.2	24539	0.15	0.45
	4	5138	−5.2	27192	0.1	0.40
2D-P	1	5143	−5.2	27	0.85	1.20
	2	5154	−5.2	32	1.6	1.60
	3	5190	−5.3	148	1.6	2.40
	4	5157	−5.2	886	1.6	2.40

注：1、2 样本为对比区样本；3、4 样本为影响区样本； N_t 为云雨、冰雪晶数浓度； P_{dm} 和 D_m 分别是冰雪晶、雨水峰值直径和最大滴直径。
Note: Samples 1 and 2 are in the contrast area, samples 3 and 4 are in the effect area. N_t : number concentration, P_{dm} : peak diameter, D_m : maximum diameter.

测到的降水粒子（雨滴和雪晶）2D-P 二维图像样本，取样高度、温度与对应 2D-C 的样品基本相同。表 2 中 1、2 号样本是第一时段试验区对比区取得的样本，取样时间为 11:25:24 和 11:26:03，浓度约为 27~32 个/ m^3 ，最大直径 2000 μm ，含水量峰值直径 1600 μm ，根据粒子图像特征判断，主要为小雨滴和霰；3、4 号样本为 11:28:23、11:31:07

表 3 第二时段试验区作业前后云雨粒子变化
Table 3 Characteristics of cloud particles in second period of time in the experiment area

仪器	样本					
Instrument	Sample	H/m	T/°C	N_t/m^{-3}	P_{dm}/mm	D_m/mm
2D-C	1	5221	−5.3	32940	0.20	0.35
	2	5222	−5.3	32354	0.20	0.55
	3	5214	−5.3	107156	0.20	0.45
	4	5222	−5.3	210067	0.15	0.45
2D-P	1	5176	−5.2	342	1.60	2.40
	2	5212	−5.3	223	0.40	3.60
	3	5210	−5.3	922	1.20	4.40
	4	5218	−5.3	1798	2.00	4.80

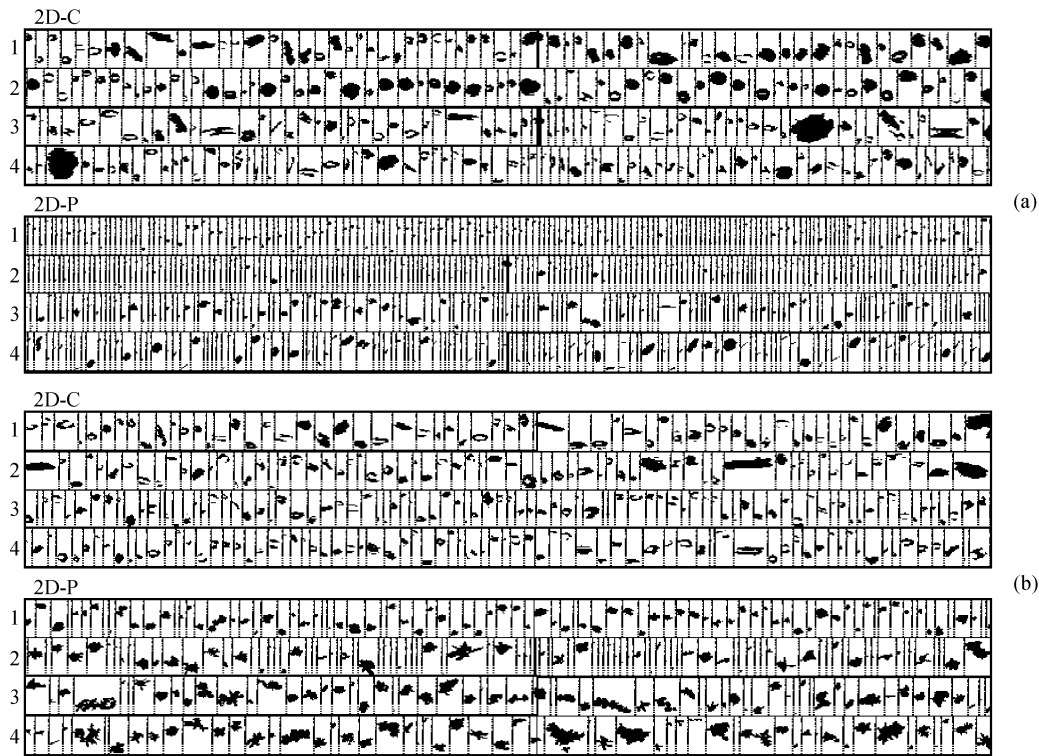


图 5 试验区作业前后降水质点二维图像样本：(a) 第一时段大云滴（2D-C）和雨滴（2D-P）形状变化；(b) 第二时段大云滴（2D-C）和雨滴（2D-P）形状变化。1、2 为对比区样本；3、4 为影响区样本
Fig. 5 Precipitation particle (cloud: 2D-C; ice crystal: 2D-P) images before and after seeding in the experiment area; (a) The first period of time; (b) the second period of time. 1 and 2 represent samples in the contrast area, 3 and 4 represent samples in the effect area

在影响区取到的降水粒子二维图像样本。降水粒子形态比播撒前复杂得多, 其中有些是柱状冰晶, 少数为密集的结凇雪片, 还有些为霰粒子和冰晶雪花聚合体, 冰晶聚合体相对浓度由对比区的 10% 增加到 29%, 浓度最多为 886 个/m³, 最大粒子直径为 2800 μm, 最大降水粒子含水量的峰值直径, 也由作业前的 1600 μm 增加到 2000 μm。影响区降水粒子浓度、含水量、降水粒子尺度和冰晶聚合体对比区都增加了很多。这一现象表明人工引晶后增加了冰晶的浓度, 在合适条件下能使冰雪晶凇附过程和聚合过程加强, 有利于增加降水, 这与人工增雨的假设相一致, 也是人工引晶的物理效应证据之一。

为了能进一步证明在人工催化后, 经过 5~10 min 的时间间隔, 人工冰晶可以迅速生长到 2D-C 和 2D-P 粒子探头所检测到的尺度, 我们计算了在理想环境状态下, 当温度为 -5℃ 时, 对水面饱和而对冰面过饱和情况下, 不同大小冰晶可能达到

表 4 -5℃ 层不同粒径的冰晶经过 6、10 min 后最大直径 (d_m)

Table 4 The maximum diameters (d_m) of ice crystal with different diameters after 6 minutes and 10 minutes growth at -5℃ temperature

初始直径 d_0 Initial diameter $d_0/\mu\text{m}$	360 s $d_m/\mu\text{m}$	600 s $d_m/\mu\text{m}$
1	134.2	173.4
10	134.9	173.9
20	136.9	177.7
40	149.2	185.2
50	186.9	216.7
100	351.6	368.4

表 5 10 μm 冰晶在不同温度下经过 6、10 min 后最大直径
Table 5 The maximum diameters of 10 μm ice crystal after 6 minutes and 10 minutes growth

T/℃	冰面过饱和度 Super saturation with respect to ice	360 s $d_m/\mu\text{m}$	600 s $d_m/\mu\text{m}$
-1	0.99 %	72.0	92.4
-2	1.99 %	97.1	124.9
-5	5.12 %	134.9	173.9
-6	6.2 %	141.9	182.6

最大增长的尺度。以薄六角片为例, 取其密度为 0.50 g/m³, 根据冰晶凝华增长公式^[6] 计算出不同粒径冰晶在保持环境湿度和温度不变的理想状态下, 凝华增长所能达到的最大尺度 (结果见表 4)。初始粒径为 10 μm 冰晶在不同温度下, 即冰面过饱和度和不同且保持不变时, 经过 6 min 和 10 min 后, 冰晶粒子凝华增长的最大尺度 (结果见表 5)。

从表 4 中可以看到, 在 -5℃ 时, 水面饱和和冰面过饱和的状况下, 无论初始尺度是 1 μm 还是 10 μm 以上的冰晶粒子, 经过 6 min, 仅仅靠凝华增长, 就可以达到 100 μm 以上, 即云雨滴重力碰并增长的降水元尺度。在环境温度为 -2℃ 时, 10 μm 冰晶 6 min 后能够增长到 97 μm, 10 min 可达 125 μm, 若 -5℃ 时, 直径 10 μm 的冰晶经过 6 min 都可增长到 135 μm 左右, 10 min 则增长到 174 μm 左右; 这些冰晶已达到降水元的尺度, 可以启动重力碰并凇附过程而进一步长大。应当指出的是, 表 4 和表 5 的数据是对单一粒子在过饱和度保持不变的理想状况下求出的, 于实际状况有很大的差别, 但也能说明在合适的条件下, 人工冰晶在很短时间内是有可能长大到降水元的尺度。另外, 在人工增雨实际过程中, 云中引入的冰晶初始状态也是单一尺度的, 在随后的生长过程中, 按照云滴随机增长理论, 有部分人工冰晶处于非常有利的生长环境下长大, 使得人工引入的冰晶在经过一段时间后, 生长成有大有小的人工冰晶谱分布。这些结果说明, 人工引入的大量冰晶在影响区长大能被 2D-C 仪器观测到。

4.2 影响区大粒子 (大云滴和冰晶) 随高度的变化

为了进一步探讨影响区云粒子生长情况, 我们在航线 EF 的下风方选择 3 个不同高度, 探测大云滴和冰晶分布状况。表 6 给出的是影响区 5695~3500 m 不同高度降水胚胎 (2D-C 大云粒子和冰晶) 平均特征值。在作业层上方 500 m (5695 m,

表 6 降水胚胎 (2D-C 大云粒子和冰晶) 随高度的变化
Table 6 Vertical profile of precipitation embryo (cloud and snow measured by 2 D-C probe)

H/m	T/℃	N/m ⁻³	P/μm	$d_m/\mu\text{m}$
5695	-6.5	91825	150	350
4631	-0.5	8135	200	700
3517	11.5	1055	250	450

−6.5℃)处,观测到浓度(N)为 91825 个/ m^3 大云滴和冰晶,峰值直径(P_d)为 150 μm ,粒子最大直径 450 μm ,从粒子形态看,其中有些是小冰晶,有些是冰晶聚合体;在 5372 m (−5.7℃)高度取得的大云滴和冰晶浓度为 13772 个/ m^3 ,峰值直径为 150 μm ,最大粒径 500 μm 。在 0℃附近 (4631 m, 温度−0.5℃) 2D-C 取得的样品,粒子浓度为 8153 个/ m^3 ,峰值直径为 200 μm ,最大粒子直径达 700 μm ,粒子中既有边缘光滑的雨滴,也有不规则的冰晶聚合体,冰晶聚合体浓度占总粒子数的 40%,另外还有一些大云滴和冰粒子;中间样本是在 0℃ (3517 m)下面观测到的,样本都是水滴,浓度有所减少。在作业高度上方观测到较高浓度的冰晶和冰晶聚合体,其原因可能是 500 hPa (5 km) 左右存在着弱不稳定层,上升气流将小冰晶带到较高高度,这样小冰晶在空中可停留较长时间,有利于冰晶的长大,冰晶长大到一定尺度将下落,在下落过程中除凝华增长外,还通过碰并聚合以及淞附过程长大,大的冰晶聚合体降落在 0℃附近融化形成降雨,0℃层附近粒子浓度减少,直径增大,说明降水粒子经历这一碰并融化过程。

在过冷区由于过冷水与冰晶共存, FSSP-100 探头探测到的云粒子浓度,不能分辨云滴与冰晶,一般认为粒径小于 5 μm 的粒子为液滴,其对应的含水量视为过冷水。表 7 给出了 FSSP-100 探头用 1~16 μm 量程观测到的对比区和影响区部分小云滴浓度和含水量平均变化情况,从中可以看到作业后云中有过冷水减少的现象,但也发现小云滴的浓度稍有增多,这可能是人工播撒所形成的冰晶部分还没来得及长大而处于较小的粒径范围所致。

4.3 作业后降水回波强度和强回波区面积变化

长春 713 和松原 718 两部雷达参加了这次综合观测试验,在整个试验期间,雷达每隔 15 分钟取一个仰角 0°或 0.5°的 PPI 降水回波图。观测表明,7 月 11 日 10 时以后松原和长春两部雷达观测到的都是层状云降水回波。长春雷达离试验区较近,在后续的分析作业前后回波强度变化时以吉林省气象台 5 cm 雷达观测的资料为依据。

飞机作业后影响区域很难被精确的划定,为了研究飞机作业后影响区域范围,将雷达观测的降水回波分为对比区、作业区和影响区三个区域。李永振^[7] 根据 1981~1983 年雷达观测分析认为影响区

表 7 对比区和影响区云粒子和含水量分布特征 (FSSP-100, 粒径 1~5 μm)

Table 7 Distribution characteristics of cloud particles and water content in the contrast area and the effect area (Measured by FSSP-100 probe, diameters from 1 to 5 μm)

		含水量 Water content / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	
		N_i/m^{-3}	
第一时段 The first period of time	对比区 Contrast area	3.74×10^6	1.140×10^{-4}
	影响区 Effect area	4.546×10^6	7.83×10^{-5}
第二时段 The second period of time	对比区 Contrast area	1.81×10^6	3.04×10^{-5}
	影响区 Effect area	1.93×10^6	2.39×10^{-5}

在作业区的下风方,扩散范围为底角 105°,长为 100 km 的扇形区内。这次作业航线长约 40 km,这样影响区约以此航线为底边,上底为 94 km,底角为 105°,高为 100 km 的等腰扇区内,主要在四平以东、辽源、盘石和双阳等地区 (如图 6 所示)。图 6a 为作业前 (11:16) 取得的降水回波图,图 6b 为作业后 15 分 (11:31) 取得的。为了减少作业的相互影响,从作业航线 (四平-怀德) 垂直于风向 50 km 范围作为隔离带,从隔离带向北取与影响区同样大小面积的区域 (双辽长岭地区) 作为对比区,作业区在四平到怀德一线。

由于飞机未能到对比区进行云的微物理观测,我们用作业前后对比区和作业区的降水最大回波强度以及 35 dBZ、30 dBZ、25 dBZ 的回波面积变化来讨论作业催化对降水云的影响。统计结果见表 8。试验期间对比区内无增雨作业试验,因此对比区回波的变化基本是自然降水的变化,而影响区增雨作业试验之前降水回波代表自然状况。增雨作业试验之前,对比区和影响区都是层状云降水回波,对比区强些,降水回波最强 35 dBZ,作业区和影响区回波弱些,最强回波为 25 dBZ。作业后 15 分钟,对比区的降水回波受系统影响整体位置略有东移,回波形态、回波强度和强回波面积变化不大;而影响区回波增强了,强回波区面积增大了,最大回波强度从 25 dBZ 增大到 30 dBZ,25 dBZ 的面积从 4500 km^2 增加到 7000 km^2 ,这些回波特征变化应是作业后云中冰晶粒子浓度增加,冰晶聚合体增

多, 降水粒子增大提高了降水强度, 在雷达 PPI 上的反应是回波强增强强回波区面积增大。

4.4 作业后影响区降水的变化

表 9 给出了作业前后影响区和对对比区降水变化。未受作业影响的双辽从 10:00~13:00, 小时降水量分别为 1.2、1.0 和 1.0, 这说明未作业区的降水作业前后变化不大; 作业区的怀德(公主岭), 降水由作业前的 0.8 mm 下降到作业时的 0.5 mm, 作业后 1 小时降雨量为 0.1 mm, 表明作业区降雨量是减少的; 影响区伊通和双阳分别从 0.4 mm 增

加到 0.8 mm 和从 0.9 mm 增加到 1.7 mm, 影响区的降水量是增加的, 影响区降水变化的幅度也比作业区和对对比区大。影响区伊通、双阳离作业区约 35~60 km, 当时作业高度为 5100 m 左右, 据探空资料知此高度上风向约 270°, 风速 16 m/s, 通过平流扩散, 作业后约 1 小时到 1 小时 20 分即可影响到影响区, 作业区和影响区降水的变化可能是受到增雨作业的影响。作业区雨量减少, 作业区下风方雨量增加, 而未受作业影响的上风方降水变化不大, 这反映了增雨作业后会引起降雨量的重新分配。

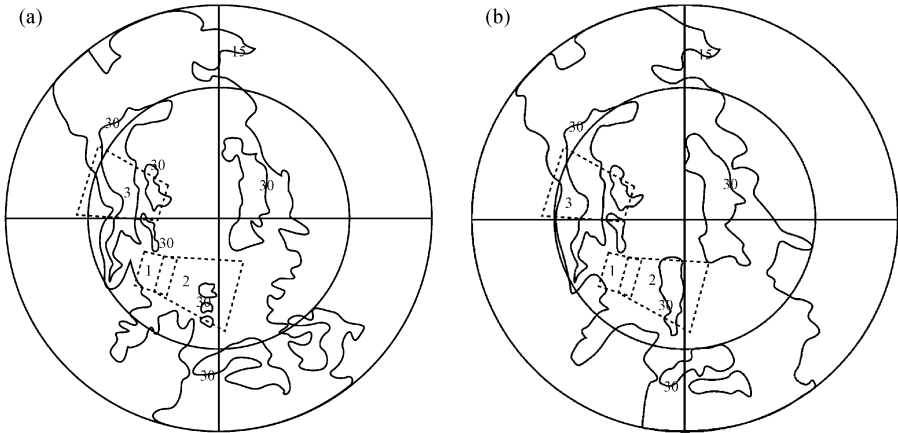


图 6 作业前 (a) 及作业后 (b) 雷达回波强度 (15、30 dBZ) 变化。1: 作业区; 2: 影响区; 3: 对比区。雷达探测最大距离 250 km
Fig. 6 Distributions of radar echo intensity (15, 30 dBZ) before (a) and after (b) seeding. 1: seeding area, 2: effect area, 3: contrast area. Radar maximum range is 250 km

表 8 作业影响区和对对比区降水回波参数变化

Table 8 Radar echo change in the seeding effect area and the contrast area

观测时间 Time	最强回波强度 Maximum echo intensity /dBZ		35 dBZ 回波面积 Area of 35 dBZ radar echo /km ²		30 dBZ 回波面积 Area of 30 dBZ radar echo /km ²		25 dBZ 回波面积 Area of 25 dBZ radar echo /km ²	
	对比区 Contrast area	影响区 Effect area	对比区 Contrast area	影响区 Effect area	对比区 Contrast area	影响区 Effect area	对比区 Contrast area	影响区 Effect area
11:16	35	25	5×12	—	50×60	—	100×70	5×2
11:30	35	30	5×12	—	50×60	30×20	100×70	50×90
11:45	35	30	5×12	—	50×60	40×30	100×70	100×70

表 9 作业前后影响区和对对比区降水变化

Table 9 Precipitation change in the seeding effect area and the contrast area

时间段 Time series	降水量 Precipitation /mm			
	对比区 (双辽) Contrast area (Shuangliao)	作业区 (怀德) Seeding area (Huaide)	影响区 (伊通) Effect area (Yitong)	影响区 (双阳) Effect area (Shuangyang)
10:00 - 11:00	1.2	0.8	—	—
11:00 - 12:00	1.0	0.5	0.4	0.9
12:00 - 13:00	1.0	0.1	0.8	1.7

5 小结

通过试验综合观测资料分析可以看出:

(1) 综合观测资料表明对比区的最大含水量达到 $0.1 \sim 0.2 \text{ g/m}^3$, 但是冰晶浓度较低, 一般为每升几个到十几个, 这说明该试验区上方的云系还有较大的引晶催化潜力, 在云系中适当增加冰晶量, 可提高降水云系中冰水转化率, 增加降水效率。

(2) 作业后影响区云中的冰晶浓度、雨滴直径对比区有明显增加, 冰晶浓度的增加是播撒 LC 后人工引晶的结果。上升气流将小冰晶带到较高处, 冰晶在空中停留时间增长, 有利于冰晶的长大, 冰晶和冰晶聚合体下落到 0°C 层附近融化成雨滴, 有利于增加地面降水。计算表明, 在 -5°C 时, 假如冰晶粒子处于最优生长条件下, 直径 $< 10 \mu\text{m}$ 的冰晶经过 6 分钟凝华增长能增长到 $103 \mu\text{m}$ 左右。这些冰晶已经达到降水元的尺度, 可以启动重力碰并过程而进一步长大。

(3) 影响区降水回波强度加强, 强回波区的面积扩大, 与 PMS 粒子探测仪在影响区探测到的雨滴直径增大是一致的, 而对比区的降水回波强度和强回波区的面积作业前后变化不大。

(4) 作业区雨量减少, 作业区下风方雨量增加, 而未受作业影响的上风方降水变化不大的观测事实反映了增雨作业后降雨量的重新分配。通过综合试验分析, 说明 LC 引晶催化层状云是有一定的

物理响应的。

参考文献 (References)

- [1] Schaefer V J. The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science*, 1946, **104**: 457~459
- [2] Fukuta N. Project mountain valley sunshine; Progress in science and technology. *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**: 1483~1493
- [3] Wakimizu K, Nishiyama K, Suzuki Y, et al. A low level penetration seeding experiment of liquid carbon dioxide in a convective cloud. *Hydrological Processes*, 2002, **16**: 2239~2253
- [4] 赵柏林, 丁荣良. 雨层云人工增雨的可能性 (一) 非封闭系统冰水转化问题. *气象学报*, 1963, **33** (3): 382~391
Zhao Bolin, Ding Rongliang. The possibility of nimbostratus precipitation enhancement (1) a problem on ice-water transmutation for non-closed system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1963, **33** (3): 382~391
- [5] Asuma Yoshio, Katsuhiko Kikuchi. Aircraft observations of precipitation particles in the winter monsoon clouds over the Japan Sea. *J. Fac. Sci.*, 1995, **9** (5): 445~462
- [6] 黄美元, 徐华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 1999. 46
Huang Meiyuan, Xu Huaying. *The Physics of Cloud and Precipitation* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 46
- [7] 李永振. 利用雷达回波参数统计特征评定人工增雨效果. *吉林气象*, 2001, (3): 29~44
Li Yongzhen. Evaluation of precipitation enhancement by statistic of radar echo data. *Jilin Weather* (in Chinese), 2001, (3): 29~44