

液态二氧化碳播云物理效应的观测研究^①

樊 鹏 陈保国

雷恒池

(陕西省人工影响天气中心, 西安 710015)

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

使用液态二氧化碳(LC)对过冷层状云进行催化后,通过飞机粒子测量系统, GPS 定位以及地面测雨雷达和地面雨强研究了催化前后云微物理参数的变化,揭示了部分因催化后产生的物理效应,特别是雷达 RHI 上 25dBz 回波在负温区出现较对称的凸起尖峰,可能是小冰晶的凝华增长释放潜热而引起的动力抬升所致。得出了催化有效的结论。

关键词: 液态二氧化碳 播云 凝华增长

引 言

迄今为止,人工增雨(雪)对过冷云进行催化的首选催化剂仍是碘化银(AgI),由于 AgI 的晶体与冰晶的晶体十分相似,且成核率高,在 -10°C 时可达到 10^{13} 个冰核。但 AgI 的成冰阈温高,为 -4°C ,成核率随温度的降低而增加。据陕西省多年进行的飞机人工增雨观测,在春、秋季一般情况下,飞机很难飞到 -10°C 左右的云层进行作业,飞机增雨播撒 AgI 的最大效益尚未发挥。因此,针对陕西的降水云系特点,需要研制另一类催化剂作为飞机增雨冷云催化剂。2001 年 11 月,我们引进了美国犹他大学福古塔教授提供的使用液态二氧化碳(LC)播云的新技术,该技术已获得美国专利。

2002 年 9 月 13 日,我们首次对过冷层状云使用 LC 进行了播云试验,本文介绍的是应用新的播撒方法得到的结果。

1 液态二氧化碳(LC)的特性

人工增雨催化剂成冰核作用有两种机制,同质核化和异质核化。同质核化通过强冷却在干冰、液氮液滴表面 -40°C 薄层中(典型的如干冰、液氮提供的冷却)产生冰晶;异质核化使用晶格常数与冰相近粒子充作冰晶胚生长成冰晶(如碘化银等)。液态二氧化碳(LC)最显著的特征是由冷却剂产生的冰晶数量几乎与温度无关。图 1 给出了每克干冰产生的冰晶数与相同质量 AgI 产生的冰晶数的比较^[1]。由图 1 可见,AgI 产生的冰晶数随温度降低而增加,而每克 LC 产生的冰晶量基本与每克干冰产生的冰晶量相同,大概接近同质核化机制能够达到的最大值(Fukuta)^[2],喷撒的 LC 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,所以在播撒作业设计中明显地优于异质冰核,不需要随着温度变化调节播撒率,LC 产生的冰晶量能够较快地通过湍流扩散为冰晶羽。对于陕西降水云型特征,飞机

^① 科学技术部“西部开发科技行动”重大攻关项目(2001BA901A41)课题资助。

经常在 $-1^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ 之间播云, LC 为播云首选催化剂。

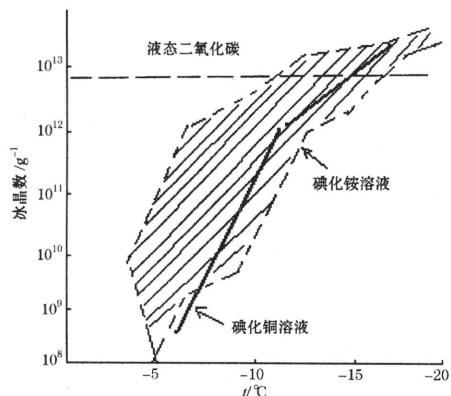


图1 干冰(Fukuta等1971)和机载碘化银发生烟器(Garvey1975)之间活化谱比较,后者用的溶液是2%,液态二氧化碳活化数基本与干冰相同
液态二氧化碳(LC)的另一个特性是无毒、无污染、无燃性。价格低廉,长期储存方便,作为液体能连续而准确地释放(在容器内 15°C 时是 52 个大气压)。

2 作业设计

2.1 机载仪器及播撒设备

2002年9月13日,在陕西延安机场上空试验了 LC 的播撒设备和播撒效果,使用运-12 型飞机,航速 $252\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,最大爬升高度 7km,飞机上安装机载 FSSP-100、2D-C、2D-P 云物理测量仪器以及机载 GPS 和温、湿度测量仪。自行开发的播撒液态二氧化碳(LC)装置安装在飞机上,LC 装在圆柱钢瓶(像医用氧气瓶,常温常压下容量为 25kg)中,当在高空使用时,能保证释放 20kg 净重量的 LC,用支架将 LC 钢瓶固定在机舱内,前支架高 17cm,后支架高 27cm,钢瓶与水平面夹角约为 10° ,钢瓶保持一斜面,使 LC 容易喷出直至喷完。喷嘴系统固定在机体下方,喷嘴与钢瓶用耐低温的特氟龙管连接。使用的 LC 由陕西兴平化工厂提供,纯度为 99.99%,经检验,能保持喷嘴连续喷撒。

2.2 播撒试验设计

影响此次降水过程的天气形势为长波槽系统,500hPa 高空图上槽线位于东北—延安—西宁一带,水汽输送由副高外围的偏南风,从卫星云图上分析得知,试验处于降水系统的后部。

飞行设计主要着眼于:验证引入 LC 催化剂后,雷达的 RHI 和 PPI 回波的演变、飞机能否观测到冰雪晶浓度的明显变化、尺度谱展宽等直接表征催化有效的物理证据。

延安站当天探空表明,本试验区内盛行偏西风,试验区设在陕西延安机场上空,采用闭合或非闭合的长方形航迹飞行(参见图2,高度为海拔高度),飞机上升分别于 3000m、3500m、4000m、4500m 每间隔 500m 作闭合航迹飞行,下降时作“>”型穿越所有作业高度上的各层落地。

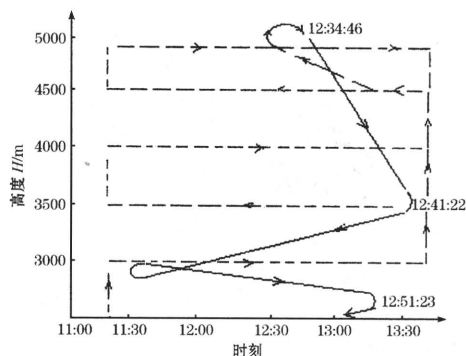


图2 作业探测飞行示意图

2.3 观测

试验区根据飞行轨迹测算为 $70 \sim 135\text{km}^2$,延安地面站位于机场的南西南方向,距机场 7km。探空和地面雨量观测均在试验区内。雷达站位于机场跑道中心正北 2km,该雷达波长 3.2cm,每小时一次观测记录了 PPI 和 RHI 图像资料。飞机和播撒区位置由 GPS 仪器确定,播撒区的高度和空气温度由机载仪器测量,同时 2D-C 探头还测量了冰粒子的变化。

3 试验结果

3.1 雷达资料及云物理过程分析

本次试验飞机于 11:26 起飞, 11:46 在 2413m 高度、环境温度达到 0°C 时即开始作业, 12:24 在 3300m 高度上作业结束, 播撒液态二氧化碳(LC) 20kg, 播撒率 $9\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$, 播撒层厚度 1000m, 12:34 在飞机爬高到 4830m 开始下降, 穿越播撒后的各高度层, 12:55 飞机落地。

图 3、图 4 分别是延安雷达站 12:26 的 RHI 和 12:24 的 PPI 回波图, RHI 是作业结束 2min 的图像, 此时, 4500m 高空上航迹长 34km, 该高度上高空风向为偏西风, 风速 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 12:15 为航迹的最左端, 12:24 为航线的最右端, 按该高度上风向风速测算, 自西向东扩散距离为 15.8km, 经平移后, 12:26 飞机位置仍在原播散扩散区内。

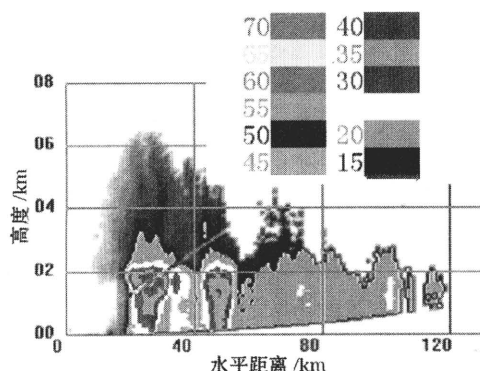


图 3 2002 年 9 月 13 日 12 时 26 分雷达 RHI
方位 120.0°

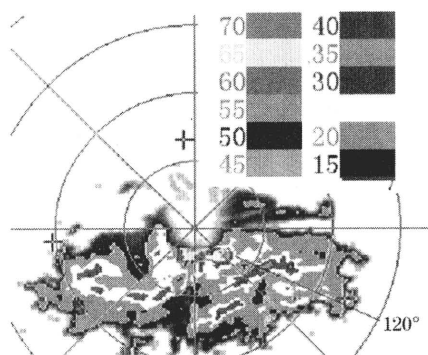


图 4 2002 年 9 月 13 日 12 时 24 分雷达
PPI(12:24)
仰角 1.0°

图 3 的回波顶高 6500m(相对高度), 雷达站海拔 1170m, 0°C 层高度按 25dBZ 的顶高约为 2230m, 在 0°C 层下方的 40dBZ 强回波区位于距雷达站 20~30km 处。奇异的现象是在 40dBZ 强回波区上方 20dBZ 廓线出现了 2 个比较对称的凸起尖峰, 对应该尖峰上方可分辨 15dBZ 回波, 其余为 10dBZ 回波。凸起的左尖峰与雷达站水平距离是 21km, 尖峰顶高相对测站 3360m, 右峰水平距离 26km, 尖峰顶高 3130m, 2 个尖峰之间的谷底距雷达站 23km, 谷底处的高度为 2830m, 2 个尖峰分别比谷底高出 300~500m, 初步分析认为此层状云系出现的尖峰可能与播撒 LC 后云内产生的动力抬升有关。

根据 Fukuta^[2] 孪生水平冰晶热泡的上滚膨胀(RET HIT)一下落增长引起侧向空气扩散(FILAS)反馈播撒机制中最佳利用相变能量的概念结构, 我们称上述两个凸起的尖峰为孪生水平冰晶热泡, 图 5 表示该过程的积云模式理论, 图 6 表示根据图 3 雷达 RHI 上读数估算的夹角。

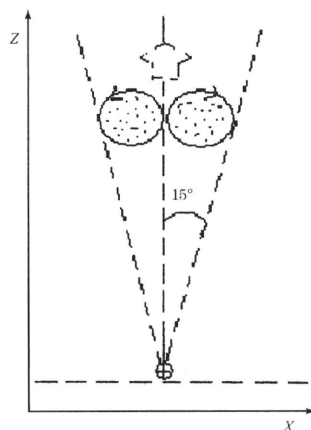


图 5 最佳播撒孪生水平冰晶热泡
上滚膨胀过程示意图

这种最佳播撒孪生水平冰晶热泡上滚膨胀过程的效应是, 除了开始播撒时热泡是水平线形式外, 冰晶热泡的运动类似积云对流。当冰晶热泡上升时, 由于作用于中心的浮力

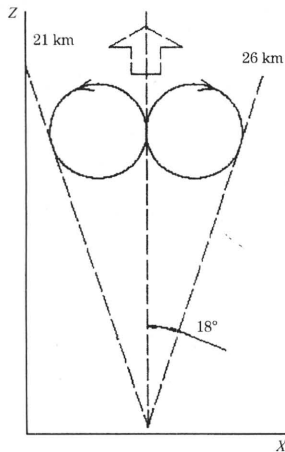


图 6 雷达实测的孪生冰晶热泡示意

代替了环形的积云对流,冰晶热泡变成了孪生圆柱,当夹卷周围过冷云、雾时,在冰晶生长潜热产生的涡流场作用下,冰晶热泡孪生圆柱上滚膨胀。如果这种积云模式被应用,那么膨胀的半垂直角应该大约是 15° (Emanuel)^[3]。而由回波凸起估算为 18° ,它和理论模式估算大致相符。由于实际过程比模式要复杂得多。但从回波凸起出现在催化之后且位于催化影响区内,因此它和催化有关,一种可能的过程是催化核化释放的潜热,诱发了局地上升气流,它们挟带因催化形成浓度明显高于背景的雪冰晶到 300~500m 高度,使背景回波强度增强形成凸起尖峰。这种现象将在今后试验中作更详细观测和分析,以期引起使用 LC 催化的注意和应用。

随高度增加冰晶热泡的上升速度应该保持大于冰晶的下落速度。欧拉坐标中,当冰晶热泡到达云、雾顶或云顶上部时,发生冰晶下落,冰晶缓慢下落或者停止或者返回,在下

面的过冷层产生相变潜热。当冰晶向运动的被加温暖空气反方向连续下落时,产生的热推动了被加热空气的上升。由于暖空气不能超过停留在顶部的原有热泡,在新热泡推动下,原有热泡中形成侧向运动或水平扩展了冰晶。FILAS 效应扩大了下落冰晶的面积,增加了被影响的云、雾体积。这种方法引发了大的动力效应,这种效应在云体的增大、降雨量方面反映了出来。该次试验的降雨量见图 7。

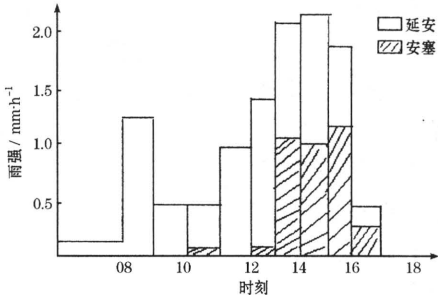


图 7 延安作业催化区和安塞对比区雨强变化

3.2 云微物理结构探讨

众所周知,冰晶生长要满足的主要因素是:(1)时间,(2)与过冷滴共存。

新近的研究结果表明,胡志晋等人^[4]一维数值模拟表明催化引入较多的人工冰晶可使部分冰面过饱和和水汽转化为降水,陈万奎等^[5]进一步展示了外场试验的物理证据,在低的过冷水含量(SLWS),人工增雨要形成有经济效益的降水,除来自云中部分 SLWS 外,还来自于冰水面饱和水汽密度差值。

本次试验用 FSSP-100 和 2D-C 云物理仪器测量了云内催化前后粒子的变化情况,见表 1。

表 1 各催化层高度上的粒子浓度变化

高度/m	FSSP-100($2\sim 5\mu\text{m}$) $N_1/\text{m}^{-3}\cdot\mu\text{m}$		2D-C($25\sim 50\mu\text{m}$) $N_2/\text{L}^{-1}\cdot 25\mu\text{m}$		FSSP-100 总含水量 $g\cdot\text{m}^{-3}$	
	背景值	催化后	背景值	催化后	背景值	催化后
3500	0.2098×10^6	0.3892×10^6	1.3	17.2	0.3×10^{-3}	0.1×10^{-3}
4000	0.2470×10^6	0.4348×10^6	3.8	27.3	2.7×10^{-3}	1.2×10^{-3}
4500	0.2559×10^6	0.2891×10^6	5.4	49.5	4.8×10^{-3}	2.9×10^{-3}

由表1可看出,2002年9月13日的降水过程因处于天气系统的后部,地面最大降水强度为 $2.3\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,故催化前云内背景值的小云滴,冰晶浓度均偏小。但由于引入LC催化后,原催化高度层过冷水含量减少,2~ $5\mu\text{m}$ 的小粒子有所增加,2D-C测量的 $25\mu\text{m}$ 冰晶浓度增大一个量级,其中大部分是催化形成的“云晶”。

3.3 地面降水分布特点

延安气象站距机场7km,在试验区内,安塞气象站位于延安站NNW方向30km处,在试验区的上风方,作为对比区。安塞站从10时开始产生降水,总降水量为3.4mm,延安站从06时开始降雨,总降水量为12mm,从图7雨强特征可看出,13~16时为过程降雨集中时段,延安站比安塞站的雨强约大一倍,可能与播撒LC有关。

4 结 语

通过使用液态二氧化碳(LC)对2003年9月13日降雨云系的播撒试验,重点对雷达RHI回波和云微理过程进行了分析研究,播撒前后出现了一些定量的变化,特别是孪生水平冰晶热泡从雷达观测的实例中得到证实,丰富了已有的理论。

(1)开发研制了LC机载播撒设备,并用于飞机人工增雨作业。

(2)根据陕西层状云降水特点,使用LC作为播云催化剂其效果优于AgI。

(3)对层状云对流泡的雷达回波特征进行了较详细的研究,讨论了孪生水平冰晶热泡形成的物理过程。

(4)从催化前后的云粒子变化和地面雨强变化分析认为,增加了地面降水。

致谢:陈万奎同志对本文提出了很好的修改意见,延安市人影办提供雷达观测服务,在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Norihiko Fukuta, 13th Conf. on Planned and Inadvertent Weather Modification, January 28—February 2, 1996, Atlanta, 164—171.
- 2 Takahashi, T., and N. Fukuta, 1988: Supercooled cloud tunnel studies on the growth of snow crystals between -4 and -20°C . J. Meteor. Soc. Japan, 66, 841—855.
- 3 Emanuel, K. A., 1994: Atmospheric Convection. Oxford Univ. press, N. Y., 580.
- 4 胡志晋,秦瑜,王玉彬. 层状冷云的数值模式. 气象学报, 1983, 41(2): 194—203.
- 5 陈万奎,严采繁. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究. 应用气象学报, 2001, 12(增): 23—29.

Observational Study of Physical Effect of Liquid Carbon Dioxide on Cloud

Fan Peng Chen Baoguo

(Shaanxi Weather Modification Research Center, Xi'an 710015)

Lei Hengchi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

After catalyzing undercooling clouds with liquid carbon dioxide (LC), the change of micro-physical parameters is analyzed by airplane particle measuring system, GPS orientation and ground radar. The results indicated that the phenomena, especially the heaving symmetrical peaks in negative temperature range observed in the 25dBz echo of radar RHI, was caused by the dynamical lifting of the coagulating growth of small ice with the latent heat releasing.

Key Words: liquid carbon dioxide catalyzed cloud physical effect