

张瑞波,刘丽君,钟小英,等. 利用新一代天气雷达资料分析飞机人工增雨作业效果[J]. 气象,2010,36(2):70-75.

# 利用新一代天气雷达资料分析 飞机人工增雨作业效果

张瑞波<sup>1</sup> 刘丽君<sup>1</sup> 钟小英<sup>1</sup> 高安宁<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 广西壮族自治区人工影响天气办公室, 南宁 530022

<sup>2</sup> 广西气象台, 南宁 530022

**提 要:** 利用 GPS 仪和新一代天气雷达的探测,对广西 2008 年 2 月 16 日一次飞机人工增雨作业的效果进行了物理检验。分析表明,对过冷云实施播云作业后,过冷云层的微物理影响能直接导致高层过冷水与冰晶混合区以及低层暖区云雨层对雷达基本反射率的增强,同时能比同等条件下非催化云层更快到达雷达回波峰值,并持续较长时间。催化作业可使冷层的雷达回波增强最大可达 200%,同时可使低层暖区云雨层的雷达回波增强最大可达 100%。

**关键词:** 新一代天气雷达, 人工影响天气, 物理检验

## Evaluation of Aircraft Weather Modification in Guangxi by the Use of CINRAD Observations

ZHANG Ruibo<sup>1</sup> LIU Lijun<sup>1</sup> ZHONG Xiaoying<sup>1</sup> GAO Anning<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Weather Modification Office of Guangxi, Nanning 530022

<sup>2</sup> Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

**Abstract:** In order to augment the precipitation on the ground, cloud seeding experiments have been carried out for more than 60 years. However, it remains to be very difficult to evaluate the seeding effect because of the large nature variations of the cloud. By the use of GPS and CINRAD techniques, a physical test was made for the operation of weather modification in Guangxi on 16 February, 2008. It shows that after the cloud seeding, microphysical changes in the supercooled clouds may lead to the enhancement of the basic reflectivity on radar in both of the supercooled cloud layer and the warm cloud and rain layer, and be more quickly in reaching the maximum value than the non-operated clouds which are under the similar conditions, and last for a longer period. After the cloud seeding, the maximum enhancement rates of the echo reflectivity in the supercooled cloud layer and in the low and warm region may reach 200% and 100%, respectively.

**Key words:** CINRAD, weather modification, physical test

## 引言

自 1946 年 Schaefer 和 Vonneget 分别发现干冰和碘化银可以在过冷水(云)中产生冰晶以来,世界上许多国家陆续开展了人工影响天气作业,并开

展了大量的外场试验。从试验效果看,一些试验观测到了人工影响对云产生的明显变化。例如 1946 年 Schaefer 采用飞机在美国 New England 上空对过冷层状云播撒干冰作业 1 小时内,在云顶观测到由于云塌产生非常明显的云洞;1987 年 Fukuta 在美国尤他州的 Stansbury 岛上空 1.5 km 对过冷层

状云播撒液态  $\text{CO}_2$  作业,10~20 分钟后观测到所产生的 3 km 宽的云洞;陕西 2000 年 3 月 14 日的播云作业后,NOAA-14 卫星观测到所产生的 9~14 km 宽的云沟<sup>[1]</sup>。但是从人工降水的效果看,由于自然降水的变率往往超过人工影响的变率,“人工信号”被自然起伏所湮没,加之地面雨量站的不足,所以长期以来对人工降水的效果检验一直存在着较大的争议。有些个例报告说作业后随着云的发展,降水相应地增加<sup>[2]</sup>,而有些报告说作业后只增加了云中冰晶数量,并没有增加地面的降水<sup>[3]</sup>,也有许多报告认为作业是否增加了降水没有确切的结论<sup>[4-6]</sup>。

目前人工降水的效果检验方法主要有两种,即统计检验和物理检验。采用统计检验方法不能弄清引起降水的因果关系,无法改进作业方法,而且需要较长的时间和较多的费用。采用物理检验方法则依赖于观测技术的改进,通过寻找作业所引起的物理变化,为识别人工影响的效果提供线索<sup>[7-10]</sup>。

天气雷达是人影作业条件识别最基本而且也是最重要的探测工具之一。随着电子技术和雷达技术的发展,新一代天气雷达为人工影响天气的效果检验提供了新的手段和工具。天气雷达探测时发出的电磁波遇到空中的悬浮粒子(空气分子、气溶胶、云雨滴、冰晶等)时,被悬浮粒子吸收和散射,其中后向散射的电磁波能量由雷达脉冲波束内的粒子数量、大小、组成、相对位置、形状和方位决定。天气雷达在接收后向散射电磁波后,可从其振幅和相位中提取目标物的反射率因子。陈冰等<sup>[11]</sup>利用新一代雷达产品分析增雨作业效果时,发现作业后 10~20 min,作业云的基本反射率由作业前最大的 40~45 dBz,增强到 50 dBz;并且最强反射率的面积比作业前增大 1 倍以上。

采用碘化银等催化剂对过冷云实施播云作业后,经过贝吉龙过程,过冷水滴转化为冰晶,并逐步成长为雪晶,经历碰并增长等一系列复杂过程后才形成地面降水。在冰粒子生长的初生阶段,由于粒子尺度较小(10  $\mu\text{m}$  左右),相对于 S 波段新一代天气雷达(波长 10 cm)的电磁波而言,其产生的瑞利散射对电磁波的衰减很小,而且在瑞利散射的情况下,对同样尺度大小的云雨粒子和冰粒子而言,冰粒子的衰减只有云雨粒子衰减的 1/5,因此,在雷达的回波上不易观测到反映冰相粒子变化的信号<sup>[12]</sup>。然而,随着冰粒子的生长,不断消耗云中的过冷水。

在催化区域内,无论暖区还是冷区,各种相态粒子的转换和尺度变化,可引起后向散射截面的变化,使雷达反射率因子的发生变化。

本文通过机载 GPS 仪和新一代天气雷达不同仰角层的探测资料,对广西 2008 年 2 月 16 日的一次飞机人工增雨作业效果进行物理分析。试图依赖 GPS 仪较精确地确定播云区域,分析催化区域及其邻近区域的反射率因子的变化,寻找出人工影响的物理信号,为物理检验提供依据。

## 1 资料来源及处理

资料取自广西 2008 年 2 月 16 日的一次飞机增雨作业资料,包括 GPS、雷达探测和当地探空资料,其中 GPS 资料来源于机载 GPS 系统的记录,记录有作业航线的时间、经纬度、飞行高度和作业状态等数据;雷达资料来源于作业当日与作业区最近的柳州新一代天气雷达(S 波段)每 6 分钟一组的探测记录;探空资料来源于作业当日上午 08 时的南宁探空记录。

对雷达探测的基本反射率资料进行二次处理,并叠加 GPS 资料,对作业区域及附近区域的雷达回波区进行采样分析。

## 2 天气形势

2008 年 2 月 16 日上午 8 时,华南静止锋位于海南岛中部,华南地区受冷高压控制。850 hPa 切变线北退到贵州和湖南中部一带,由低层偏南风携带的北部湾潮湿水汽在广西上空形成大片的层积云系,500 hPa 高度上南支高空槽东移到贵州及广西西部,不断引导地面冷空气从四川盆地补充南下影响广西。

## 3 飞机增雨作业的实施和分析资料的采集

2008 年 2 月 16 日 13 时,柳州雷达探测到在广西柳州、兴宾、贵港、灵山、扶绥和马山之间有一大片强度为 20~40 dBz 中等偏弱的降水云系,该云系云顶高度近 6 km,厚度约 5.5 km,移速约为 20~25  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,地面雨强约为 3.5  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。作业飞机

于 14 时起飞,途经南宁—崇左—钦州—贵港—来宾,进行播撒 AgI 作业,飞行高度 3600 m,云内探测温度  $-6^{\circ}\text{C}$ 。根据当时的空中观测,飞机在穿云作业中遇到了严重的结冰现象,说明云中含有较大的液态过冷水含量,且云中出現降雪。飞机于 16:38 结束作业。

在雷达回波的 PPI 与 GPS 航迹的叠加图上(图 1),选取 A( $22.89^{\circ}\text{N}$ ,  $109.41^{\circ}\text{E}$ )、B( $23.11^{\circ}\text{N}$ ,  $109.60^{\circ}\text{E}$ )、C( $23.25^{\circ}\text{N}$ ,  $109.53^{\circ}\text{E}$ )等三个作业飞机经过的点,均位于降雨回波区的中部。由于云层中相关的物理量起伏很大,因此,把以 A、B、C 三点为中心、半径约 4 km,面积约为  $50\text{ km}^2$  的周边区域,作为播云作业的采样区域。飞机经过 A、B、C 等三点的时间分别是北京时 15:37、15:44 和 15:49。根据国内外人工播云试验后所引起的云层宏观明显变化的时间长度推算,在作业后 1 小时内,应产生由于播云所致的云中固相、液相粒子在数量组成、尺度大小方面的显著变化,因此,选取 A、B、C 区域各自在催化作业前后 1 小时内的采样资料作为分析对象。考虑到催化高度上是偏西风以及 1 小时内催化剂扩散和影响不会超出  $10\sim 20\text{ km}$  的范围以及雷达回波的移速,选取以柳州雷达站为圆心,在 A、B、C 两侧与 A、B、C 等径,且分别与 A、B、C 相距 30 km,分别为 A1、A2、B1、B2、C1、C2 共 6 个区域作为对比控制区,对比控制区的采样面积也是  $50\text{ km}^2$ 。由此确保作业目标区与对比控制区采样高度的一致性,并且在采样时间内不产生相互影响。

采样区域距柳州雷达站  $115\sim 150\text{ km}$ ,为了分析暖层云雨区及冷层过冷水与冰晶混合区的回波变化,选取雷达  $0.5^{\circ}$  和  $1.5^{\circ}$  探测仰角资料,其中 A、B、C 三点所对应的  $0.5^{\circ}$  仰角的电磁波束中心高度分别为 3 km、2.6 km 和 2.2 km,所对应的  $1.5^{\circ}$  仰角的电磁波束中心高度分别为 5.7 km、4.8 km 和 4.2 km。根据当日南宁 08 时的探空,南宁 3 km、2.6 km 和 2.2 km 高度对应的温度分别为  $2^{\circ}\text{C}$ 、 $3^{\circ}\text{C}$  和  $4^{\circ}\text{C}$ ,5.7 km、4.8 km 和 4.2 km 高度对应的温度分别为  $-8^{\circ}\text{C}$ 、 $-8^{\circ}\text{C}$  和  $-7^{\circ}\text{C}$ , $0^{\circ}\text{C}$  层高度约为 3.3 km。由于在 A、B、C 等三点的上空雷达波束宽度分别为 2.5 km、2.1 km 和 1.9 km,因此可以将  $0.5^{\circ}$  和  $1.5^{\circ}$  仰角层资料(针对 A、B、C 等三点)分别视为对暖层云雨区和冷层过冷水与冰晶混合区的反映。

## 4 雷达回波分析

### 4.1 作业区域时间序列的雷达回波强度变化分析

对 A、B、C 等三个区域进行催化时间前、后 1 小时雷达回波强度值采样,分析这三个区域平均基本反射率随时间的变化(图 2),可以发现:

(1) 在雷达  $0.5^{\circ}$  仰角回波中,A、B、C 三个区域在作业后均呈现出增强的趋势,其中 A 区由催化时(15:37)的 20 dBz,经过 42 min 最大增加到 34 dBz,

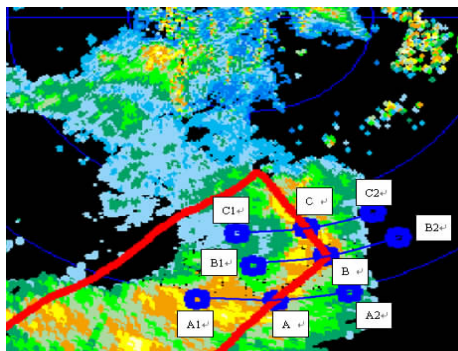


图 1 2008 年 2 月 16 日 16 时 01 分柳州雷达回波与作业飞机飞行航迹叠加图  
(蓝色斑点为所选取的样本区)

Fig. 1 The seeding track and the basic reflectivity observed by Liuzhou radar at 16:01 on 16 February, 2008  
The blue circles indicate the sampling regions

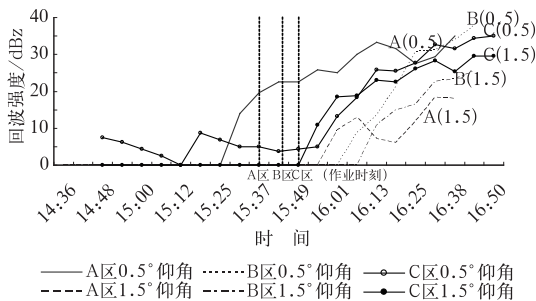


图 2 A、B、C 三个区域平均基本反射率随时间的变化图  
(A(0.5) 表示  $0.5^{\circ}$  雷达仰角探测在 A 区的回波, A(1.5) 表示  $1.5^{\circ}$  雷达仰角探测在 A 区的回波,其余类推)

Fig. 2 Mean basic reflectivity (MBR) on regions A, B and C during 14:50–16:50 on 16 Feb. 2008  
(Curve A(0.5) represents the MBR on region A with a radar elevation angle of  $0.5^{\circ}$ , and curve A(1.5) represents the MBR on region A with a radar elevation angle of  $1.5^{\circ}$ , the rest are analogous)

增强率为 70%;B 区由催化时(15:44)的 0 dBz,经过 17 min 后开始出现回波,再经过 49 min,最大增强到 37.8 dBz;C 区在催化前 30 min 维持着 4~5 dBz 的弱回波,催化 6 min 后回波开始明显增强,经过 49 min 最大增强到 33 dBz,增强率为 660%。

(2) 在雷达 1.5°仰角回波中,A、B、C 三个区域在催化后也呈现逐步增强的趋势。其中 A 区在催化前还未有回波出现,催化 22 min 后开始出现回波,再经过 13 min,回波强度增加到次峰值 13 dBz;B 区也是在催化前未有回波出现,在催化 23 min 后开始出现回波,再经过 37 min 后达到最大值 25.4 dBz;C 区也与 A、B 区一样,在催化前没有回波出现,在催化 6 min 后开始出现回波,然后回波持续增强,至 36 min 后达到最大值 28.3 dBz。

(3) 冷层(1.5°仰角)的起伏均先于暖层(0.5°仰角)的起伏。在冷层中 A 区(A(1.5)曲线)于 16:07 达到次峰值,然后下降,而暖层中 A 区(A(0.5)曲线)在 16:13 才达到次峰值,落后 6 min;B、C 区也是呈现如此的变化趋势。

上述三区雷达基本反射率的变化,反映出在播云作业后所产生的云微物理影响,导致从过冷层到暖层云中粒子组成的连锁反应:(a)不论冷层或暖层,都能在催化 10~20 min 内引起目标区雷达回波增强的趋势;(b)催化后冷层的回波峰值回落时刻普遍提前于暖层的峰值回落时刻,说明低层暖区的大云滴或雨滴是来源于高层冷区的过冷云滴或冰晶的转换和成长;(c)1.5°仰角层和 0.5°仰角层在 A、B、C 三区的雷达电磁波束中心高度差分别为 2.7 km、2.2 km 和 2 km,而这两层回波强度峰值之间的时间差都在 10 min 内,说明云中粒子可以在很短的时间里,完成从小云滴或冰晶向大云滴或雨滴的转化。

4.2 作业区域与对比控制区雷达回波强度变化分析

(1) 图 3 所示的是 A 区与 A1、A2 两个对比控制区基本反射率随时间的变化趋势。可以看出,由于云层发展的空间性变化很大,所以在同一时刻,A 目标区与其 A1、A2 控制区的雷达回波值也存在很大的差异。在冷层(1.5°仰角层)中,基本反射率随 A 目标区的回波强度值(A(1.5))由 0 dBz 上升到

12.9 dBz 需要 12 min,而 A1、A2 等控制区则分别需要 33 min 和 26 min。而在暖层(0.5°仰角层)中,催化后 A 区的回波强度值不断增强,而且持续时间达 1 h 以上。

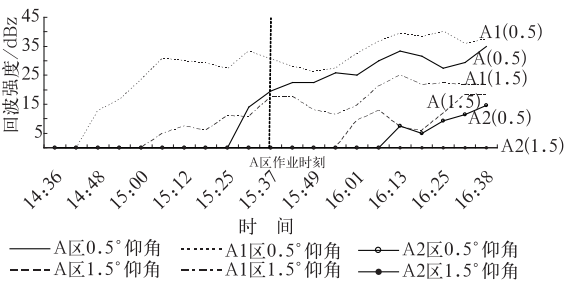


图 3 A 区与 A1、A2 两区平均基本反射率变化趋势图  
Fig. 3 Variation trends of the MBR on the targeted region A and the controlled regions A1, A2

(2) 图 4 所示是 B 区与 B1、B2 两个对比控制区时间的变化趋势。可以看出,不论在冷层还是暖层,B 目标区的回波强度值都比控制区 B1、B2 区变化快,其中在冷层(1.5°仰角层)中,B(1.5)从 0 dBz 上升到 25.4 dBz 只需要 30 min,而 B1 控制区则需要 35 min,B2 区则没有回波出现。在暖层(0.5°仰角层),B 区从 0 dBz 上升到 33.8 dBz 只需要 37 min,而 B1 区需要 78 min,B2 区则没有出现回波。

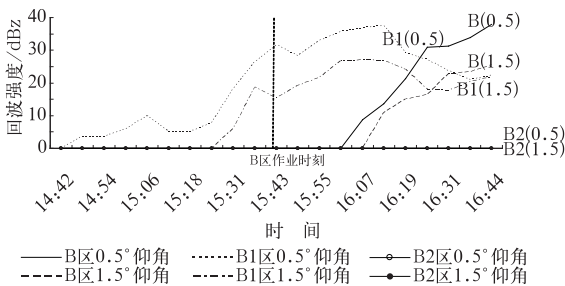


图 4 B 区与 B1、B2 两区平均基本反射率变化趋势图  
Fig. 4 Variation trends of the MBR on the targeted region B and the controlled regions B1, B2

(3) 图 5 所示是 C 区与 C1、C2 两个对比控制区基本反射率随时间的变化趋势。在冷层(1.5°仰角层),C 区和 C1 区从 0 dBz 上升到 23 dBz 都需要 24 min,C2 在 24 min 内只变化 9.6 dBz。而在暖层(0.5°仰角层),C 区从 4.2 dBz 上升到 25.8 dBz 需要 22 min,而 C1 区则需要 25 min,C2 区的回波强度只上升到 9 dBz。

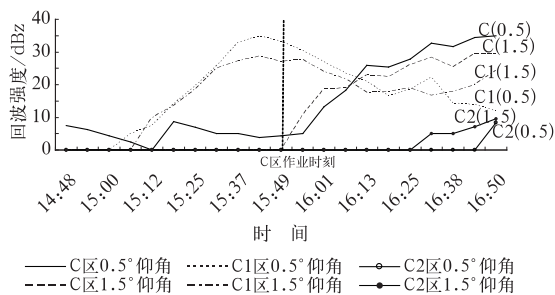


图 5 C 区与 C1、C2 两区平均基本反射率变化趋势图

Fig. 5 Variation trends of the MBR on the targeted region C and the controlled regions C1, C2

通过以上 A、B、C 等三个催化目标区与其对比控制区的雷达回波强度变化趋势比较,可以发现,尽管由于云层所处空间的差异,在同一高度上目标区与控制区的回波强度值有所不同,但是在催化后,目标区冷层和暖层的回波强度都显示出进一步增强的趋势,并且回波强度的增大比控制区来得更迅速,并且持续更长时间,最长可达到 1 小时以上。这个结果证实了在催化后,目标区冷层中的过冷水不断转化成冰晶,并加速成长;成长的冰雪晶在穿过 0℃ 层时融化,变成雨滴,使暖区的回波强度增强。

#### 4.3 催化作业区雷达回波强度的定量估算

俄罗斯在 1997 年 9 月 7 日进行了人工消雨试验<sup>[10]</sup>,在其所作的对目标区的效果分析中,采用拉格朗日法,利用控制区某时刻的雨量以及目标区上一时刻的雨量,对目标区某时刻的雨量进行了预测。为了定量分析催化作业对雷达回波的影响,我们对本文所分析的此次作业过程中雷达的回波强度值,采用欧拉法进行类似处理。

目标区雷达回波强度的预测值  $E'(i)$ ,按下式计算:

$$E'(i) = E'(i-1) \cdot K(i), \quad (i = 2, \dots, 7) \quad (1)$$

式(1)中, $i$ 为时间序列编号,编号 2 为催化时刻, $E'(1)$ 是目标区催化前一时刻、未受催化影响的回波强度实测值;预测因子  $K(i)$ 用下式表示:

$$K(i) = |E_1(i)/E_1(i-1) + E_2(i)/E_2(i-1)|/2 \quad (i = 2, \dots, 7) \quad (2)$$

其中  $E_1$ 、 $E_2$  分别为对比控制区 1 和控制区 2 的雷达回波强度实测值。

设  $E$  为目标区的雷达回波强度实测值,若  $E/E' > 1$ ,视为由于催化作业导致雷达回波强度增大,

若  $E/E' < 1$  则视为催化导致雷达回波强度减小。

图 6 是 C 区的效果分析图。A 区和 B 区由于在催化时刻,在冷层尚未有回波出现,所以不参与此项分析。从图 6 可以看到,由于云体发展的复杂性和多变性,在催化作业时间之前, $E/E'$  之值并未为 1,而是呈现出波动的趋势;经过催化后,冷层和暖层的  $E/E'$  值都有明显的增大趋势。

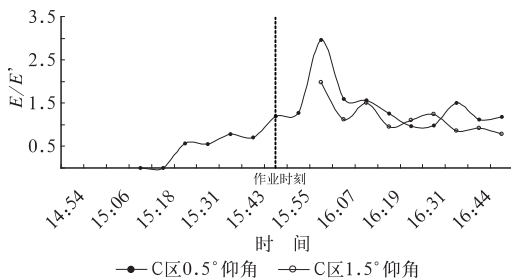


图 6 C 目标区催化效果分析

Fig. 6 The seeding effects on the targeted region C

从图 6 中可知,在催化 12 min 后,冷层(1.5°仰角层)和暖层(0.5°仰角层)的  $E/E'$  值变化达到最大,但冷层  $E/E'$  值的波动范围比暖层大。其中冷层的  $E/E'$  值最大可达 2.97,即其回波强度值最大可增强近 200%,并且保持  $E/E' > 1.5$  的时间达 18 min,保持  $E/E' > 1$  的时间达 36 min。而在暖层, $E/E'$  值最大为 1.98,即其回波强度值最大可增强近 100%,但保持  $E/E' > 1.5$  的时间只为 3 min,保持  $E/E' > 1$  的时间却达 30 min。

## 5 结语

通过上述对作业目标区及其对比控制区在不同高度的雷达回波强度变化的分析,可以得到以下初步结论:

(1) 对过冷云实施催化作业,既能对过冷层的雷达回波产生影响,也能对暖层的雷达回波产生影响;产生显著影响的时间在 10~20 min 之内,但影响的程度依据不同的云层条件决定。

(2) 对冷云实施催化作业后,在催化高度(冷层)的雷达回波强度比暖层的更快到达峰值,而二者的出现的时间差在 10 min 以内,说明催化作业可以较快地消耗过冷水,并促进暖层雨滴数量的增加。

(3) 在同一块云体中,在实施催化作业后,不论冷层还是暖层,目标区的雷达回波强度比控制区的

回波强度增强迅速,较快到达峰值,并且可持续 1 小时或较长时间。

(4) 催化作业后可引起高层(冷层)和低层(暖层)云体雷达回波强度的增强,增强的幅度最大可分别达 200%和 100%,并且回波增强的持续时间可达 30 min 以上。

参考文献

[1] Rosenfeld Daniel. Satellite-retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 44: 760-762.

[2] English M, Marwitz J D. A comparison of AgI and CO<sub>2</sub> seeding effects in Alberta cumulus clouds [J]. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20: 483-495.

[3] Hobbs P V, Politovich M K. The structure of summer convective clouds in eastern Montana. II: effects of artificial seeding [J]. Journal of Applied Meteorology, 1980, 19: 664-675.

[4] Gagim A, Neumann J. The second israeli randomized cloud seeding experiment; Evaluation of results [J]. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20: 1301-1311.

[5] Baddour O. et al. Seedability of Moroccan clouds [R]. In proceedings of Fifth WMO Scientific Conference on Weather Modification and Applied Cloud Physics. Beijing, China. World Meteorological Organization, 1989, 77-80.

[6] Westcott et al. Results of the 1989 exploratory cloud seeding experiment in Illinois based on synoptic weather conditions [J]. Journal of Weather Modification, 1993, 25: 26-49.

[7] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社. 2002;345-351.

[8] 章澄昌. 当前国外人工增雨防雹作业的效果评估[J]. 气象, 1998, 24(10):3-8.

[9] 王勇,段昌辉,徐军昶,等. 气象卫星资料在飞机人工增雨效果评估中的应用[J]. 气象, 2002, 28(11):26-28.

[10] 李大山. 87-5 大兴安岭特大森林火灾飞机人工降雨作业情况及效果分析[J]. 气象, 1987, 13(10):1-7.

[11] 陈冰,张深寿,冯晋勤,等. 新一代天气雷达产品在人工增雨作业中的应用[J]. 气象, 2003, 29(1): 23-26.

[12] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社. 2006;17-35.

[13] 张纪淮,等. 通过多种途径发展人工影响天气效果评估技术[R]. 全国人工影响天作业效果评估技术研讨会, 2006;18-24.