

刘晴,姚展予. 2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析. 气象, 39(10):1359-1368.

# 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析<sup>\*</sup>

刘 晴 姚展予

中国气象科学研究院, 中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081

**提 要:** 人工增雨效果的物理检验为评估人工影响天气的效果提供物理依据, 因此越来越受到关注, 文章根据 2009 年 5 月 1 日在河北张家口的一次积层混合云降水过程的飞机人工增雨作业探测资料, 尝试了从不同高度上寻找对比区, 来进行作业效果的物理检验。结果表明: 利用反证法思路, 发现温度在  $-10^{\circ}\text{C}$  时, FSSP-100ER 量程 1 (测量范围为  $2\sim 47\ \mu\text{m}$ ) 测量的云粒子中并不全是液相的, 也有一定量冰相云粒子存在; 而且不同高度粒子浓度急速增大的时刻与冰相云粒子陡增的时刻是趋于一致的, 观测的实际结果基本符合冷云催化原理; 降雨区域面积是扩大的, 某种程度上讲, 作业收到了一定的效果。

**关键词:** 物理检验, 机载粒子测量系统(PMS), 飞机增雨作业

**中图分类号:** P481

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.10.015

## On Physical Evaluation of Aircraft Cloud Seeding and Case Study

LIU Qing YAO Zhanyu

Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA, Chinese Academy  
of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** The physical effects assessment provides physical basis for the artificial precipitation test, so it has got more and more attentions. Based on the aircraft operations information in Zhangjiakou on May 1, 2009, this paper tries to find the contrast area from different heights to conduct the physical examination of the operational effects. The results show that: Making use of reduction to absurdity, the FSSP (range one) measurements of droplets are found to be dominated by ice phase and liquid phase when it is  $-10^{\circ}\text{C}$ , and the rapidly growing moment of concentration of the particles is relatively consistent with the rapidly growing of the ice-phase cloud particles. The actual results of observation are basically in agreement with cold cloud catalytic principle, and the enlargement of rainfall area has proved that this aircraft cloud seeding is effective to a certain extent.

**Key words:** physical evaluation, Pratical Measuring Systems (PMS), aircraft cloud seeding

## 引 言

人工影响天气效果的物理检验为评估人工影响天气的效果提供物理依据。物理检验的途径和方法, 是按对云施加影响后所可能产生的一系列物理过程变化有敏感响应的关键参数的测量要求而选择

的。云和降水的各种宏微观物理参量, 是受众多因素影响和制约的, 它们在试验中并非唯一地决定于催化方式和强度, 存在着相当大的自然变差, 而且不同类型的云物理参量和演变也有很大的差别 (Woodley et al, 2003a; 2003b; Rosenfield et al, 2004)。因此若想使飞机作业效果的物理检验行之有效, 就离不开云和降水物理观测量与观测技术的

\* 国家科技支撑计划项目(2006BAC12B02)和国家重点基础研究发展计划项目(2010CB950804)共同资助

2012年9月2日收稿; 2013年3月29日收修定稿

第一作者: 刘晴, 从事大气物理学与大气环境. Email: lq1988314@126.com

通信作者: 姚展予, 主要从事云雾物理和人工影响天气技术研究. Email: yaozy@cams.cma.gov.cn

发展(李大山等,2002;Hobbs et al, 1975)。

近些年来,在对云的宏微观物理特征及云结构分析的基础上,播云催化前后所产生的物理效应越来越被关注并取得了一定的进展。于丽娟等(2009)根据 2005 年 3 月 21 日在河南进行的层状云飞机播云试验的探测资料,对人工增雨催化前后层状云的宏微观物理量进行对比分析,发现小云粒子数浓度和由小云粒子计算的云液态水含量在催化后均减小,播撒层下方变化较之播撒层变化更加显著。周德平等(2004)对 1995 年辽宁省一次个例催化前后分析,发现在催化高度层产生了大量冰晶,冰晶与过冷云滴共存,导致了过冷小云滴减少,冰雪晶数密度增大,冰雪晶含水量明显增加;同时催化作业改变了云中各粒子谱结构,云滴谱小滴端明显下降,大值端上抬,作业层下部数密度明显减少,还结合辽宁省 1992—2004 年 6—8 月对东北冷涡云系人工增雨作业效果进行了分析,得到了作业后冰雪晶粒子的数浓度均有明显增加,粒子谱型也变宽了。金德镇等(2007)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,分析得到作业后影响区云中的冰晶浓度、雨滴直径比对比区有明显增加,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零度层附近融化成雨滴,进而增加地面降水。张佃国等(2007)利用北京地区 2003 年 8—9 月飞机观测的 PMS 资料,研究了探测云系的云粒子浓度、尺度和含量的垂直与水平分布特征和粒子谱分布状况,了解该地区中各种云粒子浓度、含量的时空分布特征,提高对云降水形成机理和云中粒子转换的认识。彭亮等(2007)借助于雷达、卫星等多种遥感探测手段,结合飞机的云中观测,对 2004 年河南云降水观测外场试验区的一次云降水过程实施了综合探测,分析得到随着云中微物理过程的发展和降水的形成,粒子谱型逐渐转为双峰或多峰型,粒子浓度明显增高,粒子直径逐渐增大。

人工增雨效果物理检验通常采用两种途径寻找物理证据,一种是分析催化云和对比云物理参量的变化和差异,宜采用对比分析和双比分析;另一种是通过分析催化前后所观测到的物理参数变化、差异(自身比较)。本文采用的是第二种方法,即自身比较。

第一种方法优点是排除了自然变异的影响,难点在于寻找状况相近的两块云,对比云还要未受到

播撒的污染,如果对比区离的比较远,还要考虑自然降雨量在时空分布是否是平稳的。第二种方法优点在于可以获得同一片云催化前后的影响效应,缺点在于不能排除自然变异的影响。要确定作业后的物理效应难点在于确定作业前后观测的是否是同一片云,这样得到的结果才有一定可信性。最理想的是有飞行轨迹和雷达图同步显示的工具,这样有利于捕捉同一片云作业前后的移动状况,进而了解云微物理的状况变化。鉴于现阶段还没有实现云移动和飞机实时跟踪指挥系统,本文使用的方法是根据雷达扫描数据的时间( $6 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ )对应 GPS 的时间在雷达图上标记当时飞机所在的位置。将所有的点汇成一个近似云和飞机匹配的轨迹图,同时需要确定云的移动速度和移动方向来寻找对比区。

本文根据 2009 年 5 月 1 日在河北张家口的一次积层混合云降水过程的飞机作业探测资料,针对作业播撒的特点与云的移动速度和方向,尝试了从不同高度上寻找对比区,来进行作业效果的物理检验。

## 1 天气背景

### 1.1 高空形势

2009 年 5 月 1 日 08 时 500 hPa 高空槽在作业区的上空,正是过境时刻。槽后的偏西北气流逐渐向东移去。张家口处于湿区,而湿区中心位于河北南部。整个湿区分布呈西南—东北走向。高空水汽条件充沛,云发展很旺盛,有较好的水汽输送,比较适合人工作业(胡志晋,2001)。850 hPa 图上,可以清楚地看到自西南往东北方向的水汽输送带,正好经过张家口(图 1 和图 2)。

### 1.2 地面形势

从 2009 年 5 月 1 日 05 和 08 时地面图的锋面低槽移动来看,作业区正处在锋面附近,锋面以每小时 50 km 左右的速度向东南方向移动,云系正在作业区上空发展,有降水云系出现,作业区内出现偏西北风,降水天气持续,其形式在一定程度上有利于进行人工增雨作业(图 3 和图 4)。

### 1.3 卫星云图

2009 年 5 月 1 日 09 时的红外云图反映,在张家口附近有降水云系发展东移,探测云是积层混合

云,探测区域为发展成熟阶段西风槽云系中部,为降水云系中部发展成熟阶段。

## 2 飞机飞行探测作业情况简介

这次 2009 年 5 月 1 日外场试验是在河北张家口地区开展的,是国家科技支撑项目组专门组织的

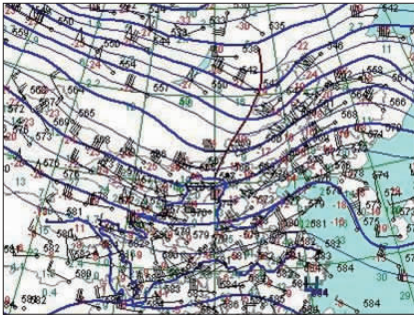


图 1 2009 年 5 月 1 日 08 时(北京时) 500 hPa 高空图

Fig.1 Aerographical chart at 500 hPa at 08:00 BT 1 May 2009

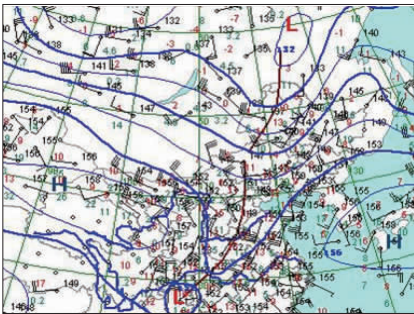


图 2 2009 年 5 月 1 日 08 时(北京时) 850 hPa 高空图

Fig.2 Aerographical chart at 850 hPa at 08:00 BT 1 May 2009

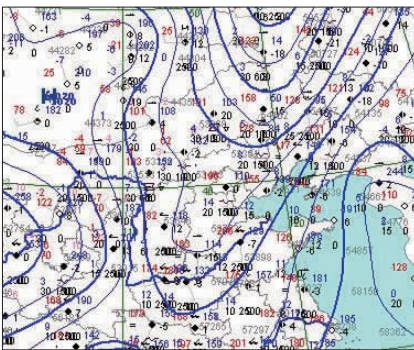


图 3 2009 年 5 月 1 日 05 时(北京时)地面图  
Fig.3 Surface chart at 05:00 BT 1 May 2009

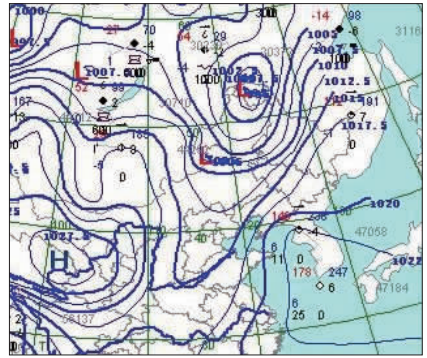


图 4 2009 年 5 月 1 日 08 时 (北京时)地面图

Fig.4 Surface chart at 08:00 BT 1 May 2009

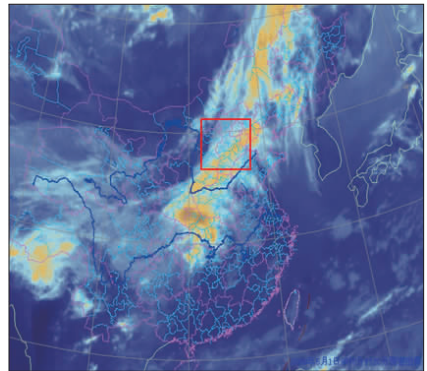


图 5 2009 年 5 月 1 日 09 时 (北京时)红外云图

[图示方框区域是作业探测区域 (40.5°~41.5°N,114°~115°E)]

Fig.5 Infrared satellite image at 09:00 BT 1 May 2009

[The framed space is the detection area (40.5°-41.5°N,114°-115°E)]

具有综合探测与联合多机飞行的一次外场试验,这次试验主要装备包括改装过的夏延 III A3625 飞机,多普勒雷达探空站和自动雨量站等,以获得相应的探测资料。

观测仪器是机载 PMS 粒子测量系统[采样探头包括气溶胶探头(PCASP-100X)、云粒子探头(FSSP-100ER)、二维灰度云粒子探头(OAP-2D-GA2)、二维灰度降水粒子探头(OAP-2D-GB2)](王维佳等,2011;张瑜等,2012),以及 GPS 定位系统,使用的资料是由云粒子探头(FSSP-100ER)、二维灰度云粒子探头(OAP-2D-GA2)和二维灰度降水粒子探头(OAP-2D-GB2)3 种采样探头获得的。

表 1 详细列举了各探头探测的主要粒子类型即

表 1 PMS 系统各探头参数列表

Table 1 Parameter list of the probe of PMS

探头名称	简称	量程	测量范围/ $\mu\text{m}$	用途
气溶胶探头	PCASP-100X	固定	0.1~3	探测气溶胶粒子
云粒子探头 (前向散射滴谱探头)	FSSP-100ER	0	5~95	探测云粒子
		1	2~47	
		2	2~32	
		3	1~16	
二维灰度云粒子探头	OAP-2D-GA2	固定	17.75~1567.75	获取二维云粒子图像
二维灰度降水粒子探头	OAP-2D-GB2	固定	106.50~9406.50	获取二维降水粒子图像

尺度范围等参数。FSSP-100ER 探头主要用于测量云粒子,其测量的粒子直径范围为 1~95  $\mu\text{m}$ ,分为 4 个量程,每个量程内又等分为 15 个测量通道,该探头的最小分辨率为 1  $\mu\text{m}$ ,有效采样面积为 0.310  $\text{mm}^2$ ,它可以直接测量运动速度为 20~125  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的粒子,本次探测试验采用的是量程 1。

飞行主探测区位于张家口附近上空。航线是行唐—天镇—张家口—崇礼—张家口—天镇—行唐。飞机从 08:27 起飞(图中蓝线)后爬升,到达 4800 m 高度在云中平飞,云带位于张家口东,呈东北—西南方向,09:27 在 4800 m 高度的云中点燃第一根焰条,09:37 同时点燃两根焰条,飞机保持在 4800 m 高度来回作业一次。09:41 飞机从张家口掉头开始爬高至 5400 m 平飞探测,09:56 飞机到达张家口之后掉头,然后开始爬升至 6000 m 平飞探测(6000 m 云量 3~4,基本接近云顶,飞机在 5400 和 6000 m 两个高度的平飞只探测不作业),10:04 飞机到达张家口开始脱离作业区,之后在 6000 m 平飞到天镇之后开始下降高度到 4800 m,10:51 又开始在另一个区域进行作业(非本文讨论的作业区),此时高空风 27.8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,11:01 作业结束开始返航。详细飞行路线见图 6。

### 3 云微物理特征对比分析

根据此次飞机观测记录,云带呈东北—西南方向,从西北向东南方向移动,移动速度大约是 30~40  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。飞机保持在 4800 m 高度沿万全—崇礼—一线平飞作业,在 5400 和 6000 m 两个高度平飞只探测不作业。

通过前文对天气形势的分析,发现作业点西边 5000 m 高空附近是槽前西西南气流,这为 4800 m 高度的云粒子的上升运动提供了有利的条件,这就提示飞机在 4800 m 高度的云中播撒作业后,可能

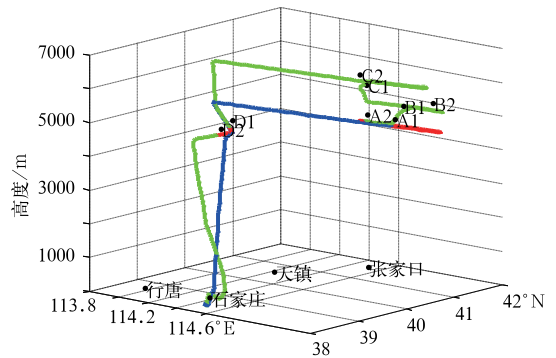


图 6 飞机 GPS 三维轨迹图

(蓝线是飞机上升阶段,红线是飞机作业阶段,绿线是作业结束阶段;A1~A2 是作业时段,高度是 4800 m;B1~B2 是 5400 m 探测阶段,C1~C2 是 6000 m 探测阶段;D1~D2 是第二次作业时段)

Fig. 6 The aircraft GPS 3-D path chart

(Blue line is the aircraft rising stage, red line is the aircraft operational stage, green line is the aircraft operational finish stage; operational period is from A1 to A2 and the height is 4800 m, detection period is from B1 to B2 and the height is 5400 m, the other detection period is from C1 to C2 and the height is 6000 m, the second operational period is from D1 to D2)

在 5400 m 的飞机平飞观测资料中看到催化作业的物理响应,而且两个高度上的飞行轨迹在沿航线方向有较长的上下重合,时间间隔也不大于 10 min。因此对比分析这两个高度上的观测资料是具有一定物理检验意义的。

另外通过对各种雷达扫描图像产品进行分析,研究作业的目标云催化前后的变化,目标云与对比云的异同等特征,可以在一定程度上判断作业的效果(周勇等,2001)。所以对雷达图也做相应统计分析,可以发现,作业后 10 min 内每一层最大高度都有所升高,云在垂直方向上也有所发展(09:27 开始作业)(表 2),从图 7 也发现作业后低层回波减弱,

表 2 2009 年 5 月 1 日 09:24—09:48

雷达回波强度以及高度统计

Table 2 Statistical results of the intensity and height of radar echo at 09:24—09:48 BT 1 May 2009

统计量/时间	09:24	09:30	09:36	09:42	09:48
15 dBz 最大高度/km	5.4	5.7	5.7	5.2	5.2
20 dBz 最大高度/km	5.1	5.3	5.3	5.0	4.9
25 dBz 最大高度/km	4.9	5.0	4.6	4.4	3.9
30 dBz 最大高度/km	3.8	4.3	3.4	3.6	3.7
最大 dBz	38	38	33	33	33

高层有所发展,出现强中心。

尝试从同一块云的不同高度上寻找对比区,来进行作业效果的物理检验,是此次检验的基本设想,之前的天气形势分析为这一设想提供了可以实现的基本前提;作业播撒的特点与云的移动速度和方向,又使通过对比分析两个高度上的观测资料来进行飞机作业的物理检验具有了一定的研究意义;通过对表 2 和图 7 中各种雷达扫描图像产品的分析,又再

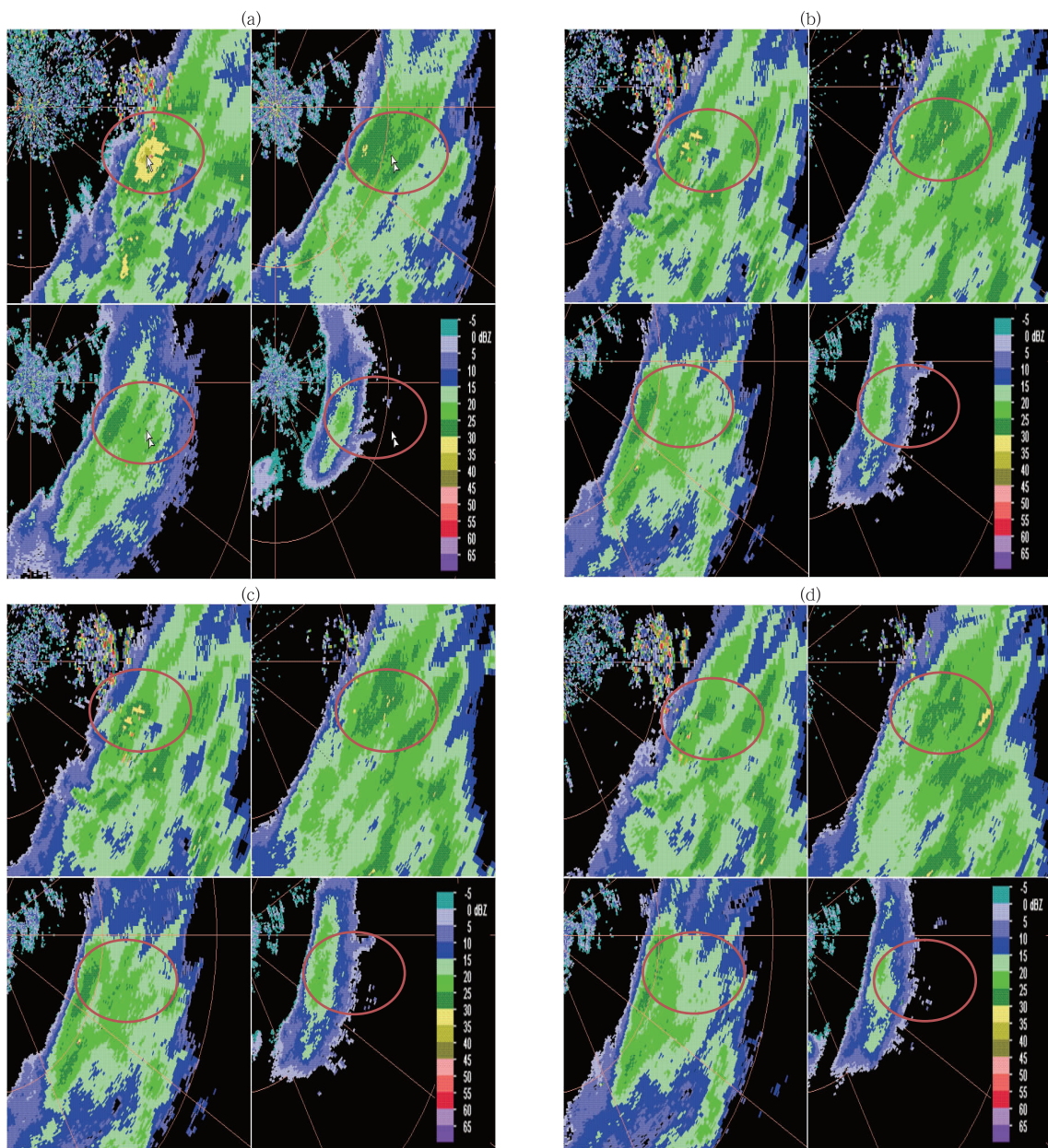


图 7 2009 年 5 月 1 日 09:24(a),09:30(b),09:42(c),09:48(d)张北 CINRAD-CB 雷达 0.5°、1.5°、2.4°、4.3°仰角反射率因子 (红色圆圈内为飞机探测和作业的大致区域)

Fig. 7 The elevation reflectivity factor of Zhangbei CINRAD-CB radar is 0.5°, 1.5°, 2.4°, 4.3° 1 May 2009 (a) 09:24, (b) 09:30, (c) 09:42, (d) 09:48 (Red circle area is the detection area)

一次地、相对定量地为该设想的合理性加以佐证。

结合当天的天气形势和各种雷达扫描图像产品的分析结果,加上受到播撒的影响,本文将结合这次飞行作业路线针对同一块云在 4800 和 5400 m 两个不同高度的云微物理特征进行分析,来进一步探究发生变化的原因。

### 3.1 不同高度 FSSP 计算液态含水量的变化

夏延Ⅲ A3625 飞机在 09:24 到达张家口上空,在 4800 m 高度平飞,云顶有阳光,决定催化,高度 4800 m,温度  $-10^{\circ}\text{C}$ ,09:27 点第一根焰条,09:37 同时点两根焰条,09:41 飞机在张家口掉头开始爬高至 5400 m,09:58 开始上升到 6000 m,10:04 飞机到达张家口开始脱离作业区,之后在 6000 m 平飞到天镇之后开始下降高度到 4800 m。

国外的一些气象学家们曾利用罗斯曼积冰探测仪(Coher et al, 2001; Kovolev et al, 2003; McFarquhar et al, 2007)或综合地面雷达观测(Field et al, 2004; Lawson et al, 2003)对  $0^{\circ}\text{C}$  层以上云的相态(液态过冷水云、冰云、冰水混合态云)进行判定,然后通过各相态云中 FSSP 谱分布的差异来说明 FSSP 量程内云粒子的相态(液相、冰相)。对于液态云和冰水混合态云来说,液态含水量(LWC)的最

佳测量仪器是热线液态含水量仪 King-LWC-5(简称 King),但是由于这次积层混合云降水过程的飞机作业探测所使用仪器的限制(没有使用 King 探头),精确、定量地界定这次探测中 FSSP-100ER 量程内云粒子相态存在一定难度,对 FSSP-100ER 量程内(本次作业使用量程 1)云粒子相态进行定性分析成了当务之急。

先假设 FSSP-100ER 该量程测量的云粒子全为液相(不包含冰相粒子),计算液态含水量 LWC 的值,如图 8 所示,整个过程液态含水量值相对较低,云中的可降水量较小,开始作业阶段 LWC 平均值只有  $0.03\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,作业后 11 min 左右(4800 m)液态含水量达到一个峰值(图 8a),分析含水量的初值和峰值都比较小,有理由认为这与该云粒子探头没有设在“满”量程有直接关系。分析图 8b 发现 5400 m 高度液态水含量的峰值为  $0.048\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,该时刻大约为 09:43,由于 09:41 飞机掉头开始爬高到 5400 m 平飞,再结合飞机 GPS 三维轨迹图(图 6),可以推断峰值区(时刻为 09:43)近似在作业区上空(可以认为是同一块云)。作业前云顶高度略大于 5000 m 左右,作业后发现 5400 m 出现液态含水量的一个峰值,而且两个高度的峰值均明显大于其他值。

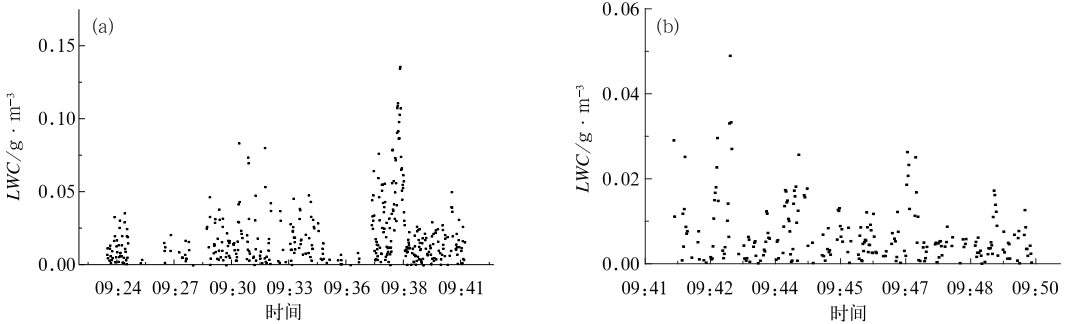


图 8 飞机 4800 m(a)和 5400 m(b)液态含水量随时间变化曲线

Fig. 8 The curve of liquid water content changing with time at 4800 m (a), and 5400 m (b)

如果猜测液态含水量增多原因是实施作业在一定程度上促进了上升运动,似乎证据不足,因为潜热释放导致的动力效应在如此短的飞行时间内是无法探测到的,何况这次探测的飞机没有进行“返回”观测,所以在这么短的时间内,造成液态含水量不减反增的原因很有可能是因为探测到的 FSSP-100ER 量程内云粒子相态不唯一,所以有理由推翻之前的假

设,肯定温度在  $-10^{\circ}\text{C}$  时, FSSP-100ER 量程 1(测量范围为  $2\sim 47\ \mu\text{m}$ )测量的云粒子中并不全是液相的,也有一定冰相云粒子存在。

近年来,许多国外的混合云综合外场观测研究都对 FSSP 量程内测量的云粒子相态进行了判断。比如, Korolev 等(2003)对加拿大锋面层状云系的观测研究表明液态过冷水云中的平均体积直径为

10~12 μm,冰云中的在 20~35 μm 之间变动,Cober 等(2001)在加拿大冻雨试验 I 和 III 的观测研究中发现混合态云中冰晶粒子的平均体积直径大于 30 μm,Field 等(2004)还发现英国混合态云和冰云中的平均体积直径都大于 30 μm。不同地区、云系中云粒子的相态差异还是比较大的。

这次飞机飞行探测作业采用冷云催化原理,使用反证法的思路,发现 FSSP-100ER 量程内测量的云粒子除了液相的以外还有冰相粒子共存,推翻了产生的错误假设以及错误结论,即催化区域液态含水量不减反增。该过程的合理解释可以归纳为催化过程中,云中产生大量冰相粒子,且浓度陡增,理论上有利于大冰粒子浓度的增加,进而有可能下落后形成降水,增加地面降水的强度。这一结论也在一定程度上印证了冷云催化的基本原理。

接着本文将继续对 OAP-2D-GA2 和 OAP-2D-

GB2 浓度的变化进行分析(OAP-2D-GA2 探头测得的粒子是大云粒子(大云滴和冰雪晶)、OAP-2D-GB2 探头测得的粒子是降水粒子。

### 3.2 不同高度 FSSP 粒子浓度以及粒子平均直径的变化

从图 9 可以看到:FSSP-100ER 测得云粒子(其中包含部分冰相云粒子)陡增的时刻为 09:38:44(此时飞行高度为 4800 m)和 09:43:16(此时飞行高度为 5400 m),4800 m 粒子浓度  $14 \times 10^7$  个·m<sup>-3</sup>,粒子平均直径大约是 18 μm;5400 m 粒子浓度接近  $15 \times 10^7$  个·m<sup>-3</sup>,粒子平均直径大约是 25 μm。

结合前文的分析,可以发现,不同高度粒子浓度的急速增大的时刻与冰相云粒子陡增的时刻是趋于一致的,且粒子的平均直径随高度的增加也有所增长。

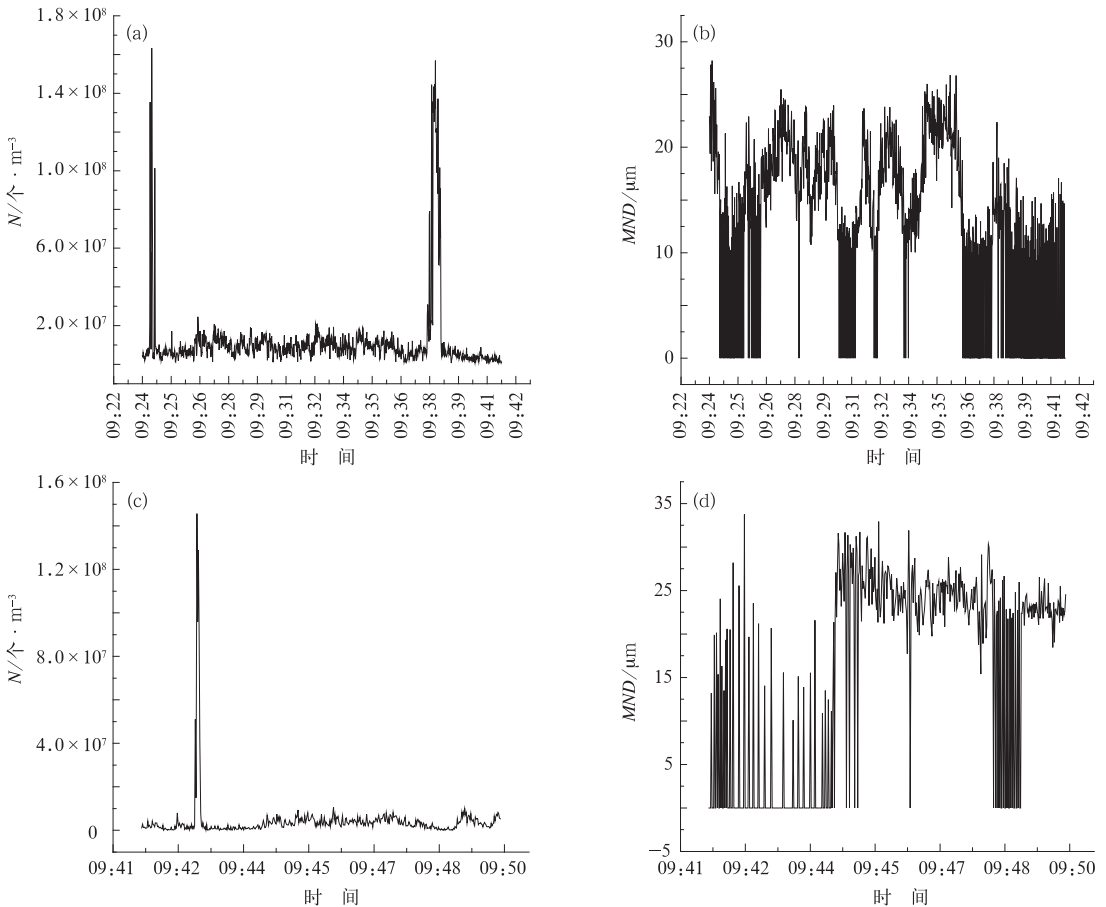


图 9 飞机 4800 m(a, b)和飞机 5400 m(c, d)粒子浓度(a, c)、粒子平均直径(b, d)随时间变化曲线

Fig. 9 The curves of particle concentration (a, c) and particle average diameter (b, d) changing with time at 4800 m (a, b), and 5400 m (c, d) heights

### 3.3 大云粒子和降水粒子的变化

图 10 给出了 4800~6000 m 飞行时段相应的 OAP-2D-GA2 和 OAP-2D-GB2 变化趋势 (OAP-2D-GA2 探头测得的粒子是大云粒子 (大云滴和冰

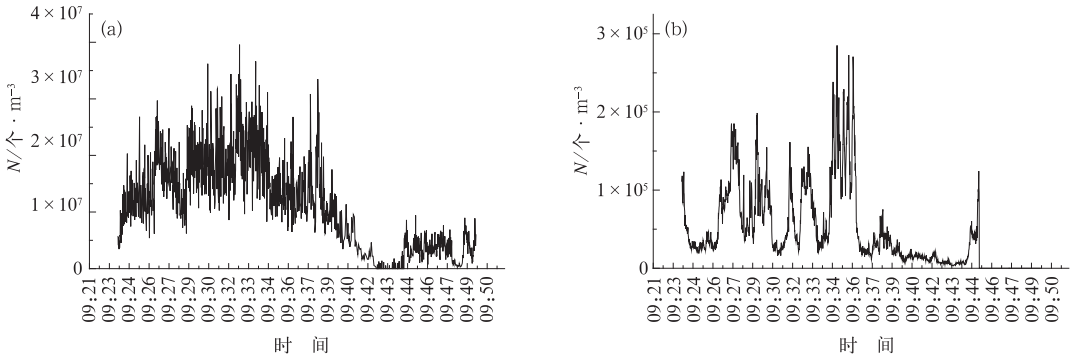


图 10 飞机 4800~6000 m OAP-2D-GA2 (a), OAP-2D-GB2 (b) 浓度随时间趋势变化曲线

Fig. 10 The curves of OAP-2D-GA2 particle concentration and OAP-2D-GB2 particle concentration changing with time from 4800 m to 6000 m

从大云粒子和降水粒子的浓度变化曲线,可以发现,飞机进行低层播撒 (4800 m) 时的粒子浓度是很大的,所以可以初步估计,低层播撒对大云滴粒子和冰雪晶粒子的形成还是起到了一定的促进作用,使得云中的过冷水含量有所下降,降水粒子逐渐形成增多,且浓度相对会有所增加,随后下落后形成降水。

### 4 地面降雨量分析

图 11 给出了作业开始到结束 4 个小时内的降雨量分布图。该图是对加密自动站的降雨量数据插值到地形图上得到的。从几个时次降雨量分布可以看出:09 时左右开始作业,此时在作业区已出现降雨,最大是 5 mm,非催化对比区降雨量最大是 3 mm。作业 1 小时之后,影响区以及对比区降雨量都明显地减少。作业影响区的最大降雨量降低到 3 mm,虽然降雨量减少,但是降雨区域面积比原来扩大了。非催化对比区 10 时以后已无降雨。

由上文分析可知,此次探测的第一次作业持续了将近 15 min。虽然地面降雨量并没有增加,但是降雨幅度减缓了,降雨区域面积扩大了一些。综合

雪晶)、OAP-2D-GB2 探头测得的粒子是降水粒子),由图 10 可见,测得的大云粒子的浓度比降水粒子要大两个量级;而且对于两种粒子而言,4800 m 高度粒子浓度比 5400 m 要高,粒子浓度随高度的升高而明显下降。

分析,也可以在某种程度上说明作业确实收到了一定的效果。

### 5 结语

此次云带位于张家口东,呈东北—西南方向,从西北向东南方向移动,移动速度大约是 30~40 km·h<sup>-1</sup>。飞机保持在 4800 m 高度来回作业,作业区域是云系的中部,属于“低层播撒”,在 5400 和 6000 m 只探测不作业。考虑到作业时间、部位和上升气流状况,认为飞机先在 4800 m 的播撒,可能在之后的 5400 m 的观测资料中看到物理响应,而且两个高度上的飞行轨迹上下重合,时间间隙也不大于 10 min。通过对各种雷达扫描图像产品进行分析,发现作业 10 min 后每一层最大高度都有所升高,云在垂直方向上也有所发展,且作业后低层回波减弱,高层有所发展,出现强中心,所以本文尝试从同一块云的不同高度上寻找对比区进行作业效果的物理检验。

飞机保持 4800 m 来回作业一次,再爬升到 5400 和 6000 m 高度来回探测一次但是不作业。对不同高度的云微物理的特性进行了对比分析。



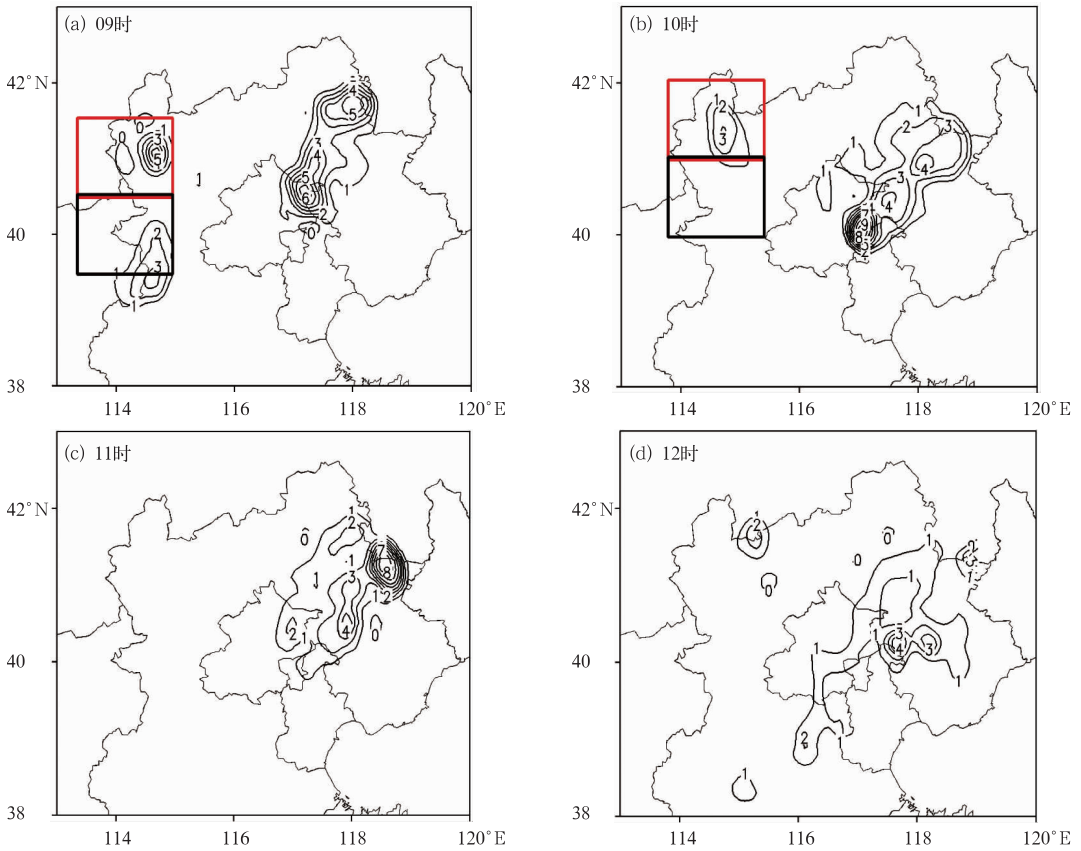


图 11 张家口 2009 年 5 月 1 日 09—12 时影响区降雨量分布图

[(a) 上方方框区域是飞机作业催化区域,下方方框区域是非催化区;  
(b) 上方方框区域是催化后影响区,下方方框区域是非催化区对比区]

Fig. 11 The images of affected zone rainfall in Zhangjiakou from 09:00—12:00 BT 1 May 2009

[(a) upper frame is the aircraft operational region, lower frame is non-operation region; (b) upper frame is the affected area after the operation, the lower frame is the comparison area]

(1) 利用反证法的思路,发现 FSSP-100ER 量程内测量的云粒子除了液相的以外还有冰相粒子共存,催化后云中产生一定数量的冰相粒子,且浓度陡增,理论上有利于大冰粒子浓度的增加,进而有可能下落后形成降水,增加地面降水的强度,同时在一定程度上印证了冷云催化的基本原理。

(2) 不同高度粒子浓度的急速增大的时刻与冰相云粒子陡增的时刻是趋于一致的,且粒子的平均直径随高度的增加也有所增长。在 FSSP-100ER 测得冰相云粒子陡增的时刻,4800 m 粒子浓度  $14 \times 10^7$  个  $\cdot m^{-3}$ ,粒子平均直径大约是  $18 \mu m$ ;5400 m 粒子浓度接近  $15 \times 10^7$  个  $\cdot m^{-3}$ ,粒子平均直径大约是  $25 \mu m$ 。

(3) 分析 4800~6000 m 飞行时段相应的 OAP-

2D-GA2 和 OAP-2D-GB2 变化趋势,发现测得的大云粒子的浓度比降水粒子要大两个量级;而且对于两种粒子而言,粒子浓度随高度的升高而明显下降。

(4) 虽然地面降雨量并没有增加,但是降低幅度减缓了,降雨区域面积扩大了一些。在某种程度上说明作业收到了一定的效果。

### 参考文献

胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报, 12(增刊): 10-13.

金德镇, 雷恒池, 郑娇恒, 等. 2007. 液态 CO<sub>2</sub> 人工引晶后云微物理和降水变化的观测分析. 大气科学, 31(1): 99-108.

李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 2002. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 325-356.

彭亮, 姚展予, 戴进, 等. 2007. 河南春季一次云降水过程的宏微观物

- 理特征分析. *气象*, 33(5):3-11.
- 王维佳,董晓波,石立新,等. 2011. 一次秋季暖云微物理结构探测试验. *气象科技*, 39(5):656-660.
- 于丽娟,姚展予. 2009. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析. *气象*, 35(10):8-24.
- 张佃国,郭学良,付丹红,等. 2007. 2003 年 8—9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究. *大气科学*, 31(4):596-610.
- 张瑜,银燕,石立新,等. 2012. 2007 年秋季河北地区云微物理结构的飞机探测分析. *高原气象*, 31(2):530-537.
- 周德平,宫福久,高建春,等. 2004. 一次飞机播云的微物理效应分析. *气象科学*, 12(24):406-411.
- 周勇,王斌,唐仁茂,等. 2001. 对流云增雨作业效果回波对比分析. *应用气象学报*, 12(增刊):158-163.
- Cober S G, George A I, Korolev A V, et al. 2001. Assessing cloud-phase conditions. *J Appl Meteor*, 40:1967-1983.
- Field P R, Hogan R J, Brown P R A, et al. 2004. Simultaneous radar and aircraft observations of mixed-phase cloud at the 100-m scale. *Q J R Meteorol Soc*, 130:1877-1904.
- Hobbs P V, Radke L R. 1975. The nature of winter clouds and precipitation in Cascade Mountains and their modification by artificial seeding. Part II: Techniques for the physical evaluation of seeding. *J Appl Meteor*, 14(5):805-818.
- Korolev A V, Isaac G A, Cober S G, et al. 2003. Microphysical characterization of mixed-phase clouds. *Q J R Meteorol Soc*, 129:39-65.
- Lawson R P, Zuidema P. 2009. Aircraft microphysical and surface-based radar observations of summertime Arctic clouds. *J Atmos Sci*, 66:3505-3529.
- McFarquhar G M, Zhang G, Poellot M R, et al. 2007. Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment: 1. Observations. *J Geophys Res*, 112: D24201.
- Rosenfeld D, Woodley W. 2004. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud seeding programs in Texas. *J Appl Meteor*, 43:249-263.
- Woodley W, Rosenfeld D, Silverman B. 2003a. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part I: The demonstration experiment. *J Appl Meteor*, 42:920-938.
- Woodley W, Rosenfeld D, Silverman B. 2003b. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part II: Exploratory analyses. *J Appl Meteor*, 42:939-951.