

辛乐,姚展予. 一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析[J]. 气象, 2011, 37(2): 194-202.

一次积层混合云飞机播云对云 微物理过程影响效应的分析^{*}

辛 乐 姚展予

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

提 要: 人工增雨效果评估主要关注的是催化后云和降水过程是否产生了预期的变化, 这首先表现在云和降水的宏微观过程有无明显变化, 因此了解播云作业后的云微物理结构的变化是很必要的。2009 年 4 月 18 日在河北张家口进行了一次飞机播云实验, 本文采用飞机探测所取得的 PMS 资料, 分析了播云对云微物理过程影响, 并进行了云物理因子综合研究。结果表明: 催化后播云高度上液态含水量大幅度降低, 粒子平均直径由催化前 $20.4\ \mu\text{m}$ 增大到 $23.9\ \mu\text{m}$; 云中粒子谱结构也发生很大的变化, 催化后冰晶减少, 降水尺度粒子显著增加; 而且在播云 1 小时后影响区地面累计降雨量达到最大。

关键词: 飞机播云, 机载粒子测量系统(PMS), 云物理参数, 效果检验

Studies on the Microphysical Characteristics of an Aircraft Seeding in Convective Line with Trailing Stratiform Cloud

XIN Le YAO Zhanyu

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

Abstract: Seeding effect evaluation is focused on whether the clouds and precipitation produced the expected significant changes after the cloud seeding, which is manifested in the process of macro and micro changes, thus it is necessary to learn something about cloud microphysical characteristics after cloud seeding. Based on the PMS data of an artificial precipitation in a convective line with trailing stratiform cloud system in Hebei Province on April 18, 2009, the cloud microphysical characteristics are studied. The results indicate that: accompanied by a significant reduction of the liquid water content after seeding, the average particle diameter increases from $20.4\ \mu\text{m}$ to $23.9\ \mu\text{m}$; the spectrums of cloud particles have also undergone great changes in the structure. Simultaneously, the number of ice crystals reduces, but the size of precipitation particles increases significantly; in the cloud-seeding affected zone on the ground an hour later, the accumulated rainfall reaches the maximum.

Key words: aircraft cloud seeding, PMS (particle measuring system), microphysical characteristics, effect evaluation

引 言

人工增雨的效果检验是当前工作亟待解决的重

要课题之一,也是人工增雨作业中必不可少、难以回避的重要环节之一,客观地、科学地、定量地评价人工影响的效果是人工影响天气学科研究的重要组成部分^[1-3]。

^{*} 国家科技支撑计划课题“混合云人工增雨技术研究”(2006BAC12B02);科技部公益性行业(气象)科研专项项目“京津经济区及华北区域气溶胶对云的改变导致的降水变化及其在天气预报中的应用”(GYHY200706036)共同资助

2009 年 12 月 25 日收稿; 2010 年 1 月 28 日收修定稿

第一作者:辛乐,从事大气物理与大气环境研究. Email: xinle2009@sina.com

目前效果评估方法主要有统计检验方法、物理检验方法和数值模拟方法等。效果的统计检验方法以数理统计为基础,它实际上是统计抽样理论的一种应用,能在一定的显著性水平上得出定量的增雨效果,便于评价作业的有效性^[4-7]。著名的以色列人工降雨随机交叉试验^[7]和我国福建省古田人工降雨回归试验^[3]等都是运用统计检验方法证明了作业显著效果。

对于大多数的飞机人工增雨作业来说,由于抗旱减灾目的难以采用随机化设计方案,因此很难用统计方法评估作业效果。在这种情况下,采集与作业后物理过程变化有直接关系或间接关系的物理学信息进行物理检验,为评估人工催化效果提供物理学证据,对人工增雨科学原理的验证、作业方案的制定和催化技术的改进都具有重要价值^[9]。

人工影响天气在理论基础或基本原理上、在实验检验和在数值模拟论证上,三方面的结果还是一致的,可相互验证的。这些工作的特点是其中条件、状态和过程都是清楚的。但在实际的人工影响天气作业中,对作业云体的具体条件、状态、结构和过程还不够了解,个例物理检验就要作这一环节的探讨,它不仅可直接看到作业的效应,也是统计检验的物理基础。在不同的天气系统和不同地形条件下,云系的宏、微观结构和降水物理过程存在着多变性和复杂性^[10-11],为了提高人工催化的效果和成功率,必须对云的宏观、微观物理结构有比较详细的了解,才能更好地选择催化作业时机和最佳作业部位^[12]。陶树旺等^[13]用 PMS 观测资料研究了云、降水微物理特征,并提出用 PMS 观测资料确定人工增雨可播度的指标。杨文霞等^[14]对 1991 年 5 月 25 日和 1992 年 6 月 20—21 日的两次天气过程的 4 架次飞行个例的 PMS 资料进行分析研究认为:河北省春季层状云降水系统存在不均匀性,表现之一为空中较强降水云带和地面降雨量分布具有很好的对应关系。于丽娟等^[15]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。张蓄等^[16]在北京奥运会人工消雨作业中分析了作业云不同档回波强度面积随时间的变化,得到回波变化的特征是强回波面积逐渐减少,而弱回波面积则在逐渐增加。彭亮等^[17]研究了河南一个例的雷

达回波高度、回波云顶高度等的变化,同时分析了作业前后谱型的变化认为,降水前云中粒子谱型主要为单峰型,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。本文根据 2009 年 4 月 18 日课题组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,结合同期的天气、卫星资料以及雷达资料分析了该次降水的天气过程和云的宏、微观物理特征,并讨论了云带的水平及垂直结构、云中液态水含量、云粒子平均直径和粒子谱特征等。

1 天气背景

1.1 高空形势

2009 年 4 月 18 日 08 时(北京时,下同)500 hPa 形势图上,贝加尔湖附近呈两槽一脊型,在我国华北到贝加尔湖之间出现反位相环流,有弱的冷平流从新疆北部向华北输送,内蒙古到四川一带有一高空槽发展东移,华北、华东地区处于槽前,四川盆地至山东处于西南暖湿气流输送带;850 hPa 形势图上,贵州北部、湖南、湖北至安徽南部存在一条明显的东北—西南向切变线,河南、河北和山东有西南急流输送水汽。高空形势的发展有利于河北山东和内蒙古地区降水,也是人工增雨的有利时机(图略)。

1.2 地面形势

在地面图上,内蒙古一带有低压发展并向东南方向移动,4 月 18 日 14—20 时,不稳定低压环流,带着潮湿的水汽缓慢移动,从内蒙古、山西到陕西可以分析出一条明显的锋面,锋面前方有雷暴出现。在这种有利的大尺度环境条件下,地面的中尺度低压及相伴的中尺度辐合区对降水有重要作用(图略)。

1.3 卫星云图

从 2009 年 4 月 18 日 14 时北京时的红外云图(图 1)可以看出,36°N、109°E 附近的黄河流域有带状的中低云区,其中有对流云团活动,这里是一个高湿带,与其北部的晴空区和低湿带形成鲜明对比。随着高空槽东移,中高层能量下传和地面低压向东偏南的移动和发展,长江以北的暖湿气流北送,黄河以北的对流云得到充分的发展。2009 年 4 月 18 日 14—20 时(图 1b,其他时刻略),陕西和山西出现大面

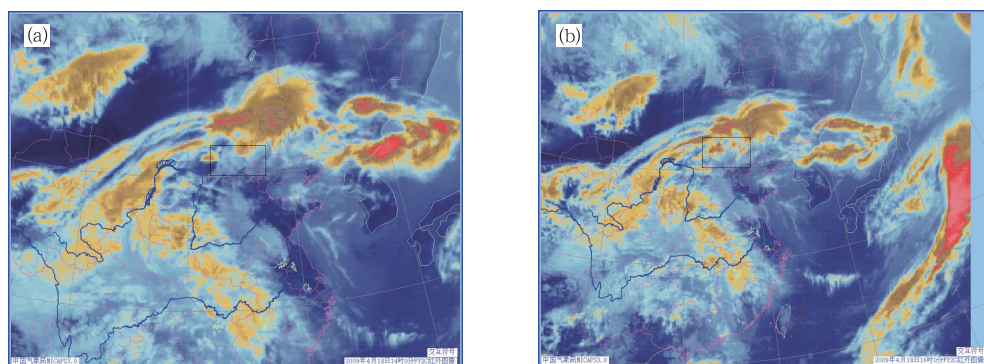


图 1 2009 年 4 月 18 日 14 时(a)和 16 时(b)红外云图(北京时间,下同)

方框区域(40.5°~41.5°N,114°~115°E)是作业探测区域

Fig. 1 Infrared satellite images at (a) 14:00 BT 18 April 2009, and (b) 16:00 BT 18 April 2009

The box area is the research area (40.5°–41.5°N, 114°–115°E)

积的降水云带。在这类有高空环流背景和地面辐合上升气流天气形势下,进行人工增雨作业,有较高的成功率。

2 飞机飞行探测作业情况简介

本次 2009 年 4 月 18 日外场试验是在河北张家口地区开展的,探测的飞机采用的是夏延Ⅲ 3625 飞机,观测仪器是机载 PMS 粒子测量系统^[18](采样探头包括 PCASP-100X、FSSP-100-ER、2D-C 和 2D-P),以及 GPS 定位系统,使用的资料是由一维前向

散射滴谱测量仪(FSSP-ER)、二维云粒子谱测量仪(2D-C)和二维降水粒子谱测量仪(2D-P)三个采样探头获得的。

飞行主探测区位于张北附近上空。航线是行唐—天镇—探测区—天镇—行唐。飞机从 16:18 起飞(图 2 中蓝线)到了阜平上空大约 4800 m 高度开始平飞,在 17:10(A)到达探测区,然后开始进行空中播撒作业到达 B 点(17:21)开始掉头向南,到 17:30(C)再一次掉头,在空中飞了两个来回,上升到 5100 m,一直到 18:11(I)作业结束,飞机返航。作业持续 1 小时左右,详细飞行路线见图 2。

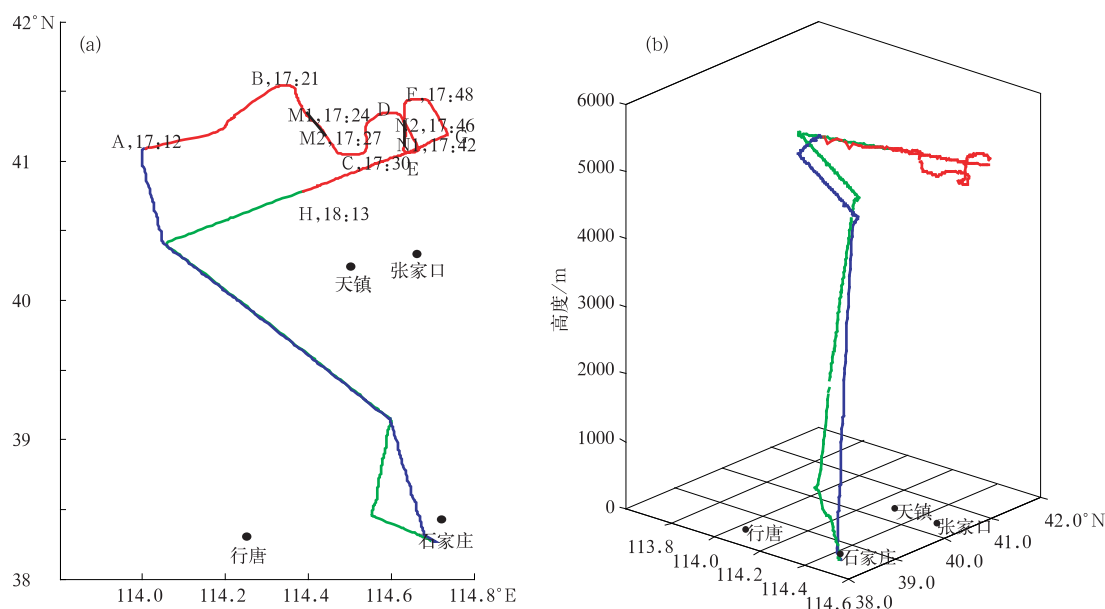


图 2 飞机探测轨迹图(a)二维平面图;(b)三维立体图

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,其中 M1~M2(17:24~17:30)

是自然云观测段,N1~N2(17:42~17:48)是播撒后观测段

Fig. 2 The whole flying track (the blue line represents the up-phase) two-dimensional and (b) three-dimensional)

the red line the operational phase, and the green line the end of operational phase. Line M1—M2 (17:24—17:30 BT) is a natural cloud observation stage and N1—N2 (17:42—17:48 BT) is a seeding effect observation stage.

3 自然云微物理特征分析

3.1 大气和云的垂直结构

从张家口大气廓线的分析图可以看出,650 hPa、850 hPa 相对湿度较高,750 hPa 饱和水汽压较

高,即水汽含量较多,850 hPa 到 750 hPa 为逆温层(图 3)。这种温湿垂直结构可能易使水汽在低层聚积形成层云,然后随逆温层破坏而发生对流,演变成层积混合云;上升运动的抬升至 650 hPa 以上相对湿度较高的区域,水凝物粒子抬升到更有利于增长的高度,从而使降水粒子的平均直径增大。

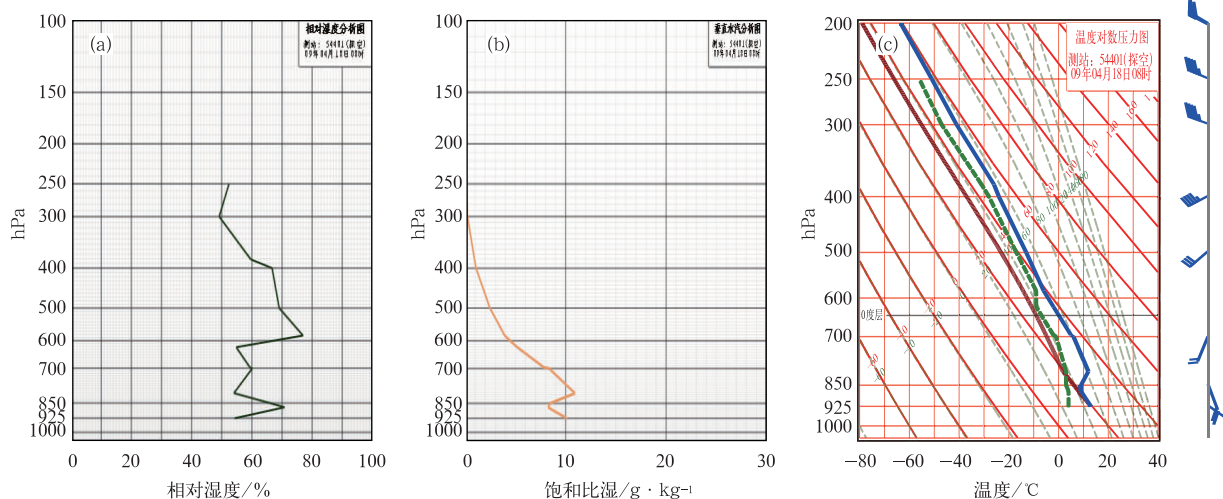


图 3 2009 年 4 月 18 日 8 时张家口相对湿度分析图(a)、垂直水汽分析图(b)、温度对数压力图(c)
Fig. 3 Charts for relative humidity analysis (a), vertical water vapor analysis (b) and emagram (c) in Zhangjiakou City at 08:00 BT 18 April 2009

图 4 给出了 2009 年 4 月 18 日飞机上升阶段微物理参数的垂直分布(FSSP-ER 资料)。可以看到:

云具有不同的分层结构;垂直方向上具有明显的不均匀性;在 3000 m 到 4000 m 是云水的丰水区。

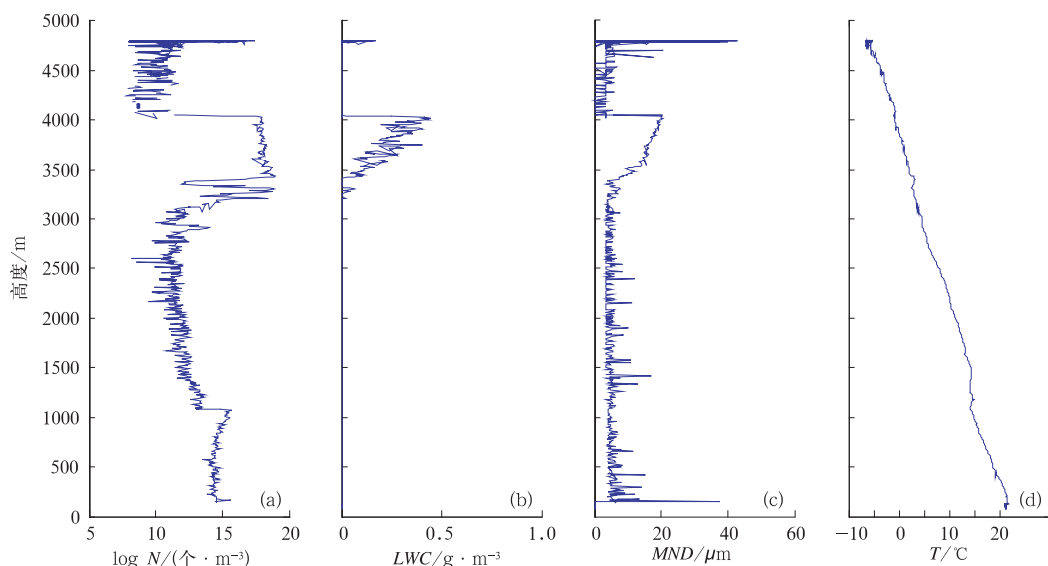


图 4 飞机上升阶段(16:21—16:37)水滴浓度(a)、云液态含水量(b)、平均直径(c)及温度(d)垂直廓线
Fig. 4 Vertical profiles of cloud droplet concentration (a), cloud liquid water content (b) mean diameter (c), and temperature (d) during up-phase (16:21—16:37 BT 18 April 2009)

从水滴浓度(N)、粒子平均直径(MND)以及液态含水量(LWC)的垂直分布来看,3200~3600 m 高度云系分布也不均匀;3700~4100 m 高度 LWC 随高度上升而增大, MND 浓度随高度上升而减少,

LWC 高对应 N 和 MND 值减少,表明过冷云水未充分转化,云系正在对流发展,稍施加人工干扰可增强对流发展,将湿空气和水凝物粒子抬升至更高的高度,从而使降水粒子的平均直径增大。

3.2 可播性分析

云的可播性是指云是否具有人工增雨的必要条件,因而云是否具有可播性关系到播云的成功与否。陶树旺等^[12]综合分析了河南省 2000 年 4—5 月的 4 次层状冷云人工增雨过程的雷达、PMS 探测资料以及 GPS 定位资料后,提出应以 PMS 的 FSSP-100 探头探测的云中粒子浓度以及 2D-C 探头探测的云中大粒子浓度作为判别云中可播性的主要技术参量,并发展了层状冷云飞飞机人工增雨实时监测指挥技

术,指出 FSSP-100 探测的粒子浓度不小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的云区才具有一定的可播性,其中 2D-C 探测的大粒子浓度小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可确定为强可播区,否则为可播区。参考上述判别指标,对 2009 年 4 月 18 日飞机作业资料进行云中可播性分析,可以看出本次作业云 FSSP 探测(这里采用的是 FSSP-ER 的资料)的粒子浓度不小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的云区占很大的比例(图 5a),同时又发现 2D-C 探测的大粒子浓度小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 的强可播区存在(图 5b),因此本次作业云是具有一定可播性的。

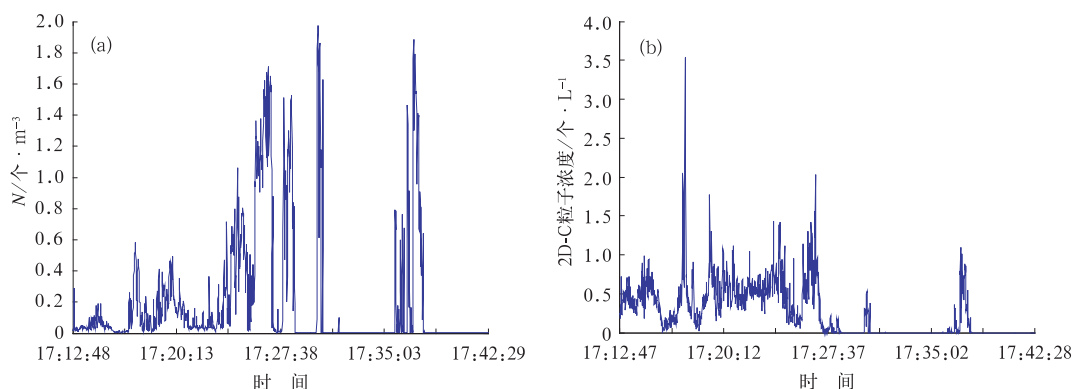


图 5 飞机 4800 m 平飞 FSSP 粒子浓度(a)和 2D-C 粒子浓度(b)随时间变化曲线

Fig. 5 Time plots of FSSP particle concentration at 4800 m (a) and 2D-C particle concentration (b) at 4800 m height flight

4 播撒前后的云微物理特征对比分析

要确定作业效果的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度。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 分钟一次)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,找到回波敏感区,确认是否受到污染,之后观察回波敏感区雷达回波的变化以及飞机轨迹确定催化后观测段。

结合本个例的飞行情况以及雷达 CAPPI 图和 GPS 的定位,对比的云选取的是图 6a 所示的回波区

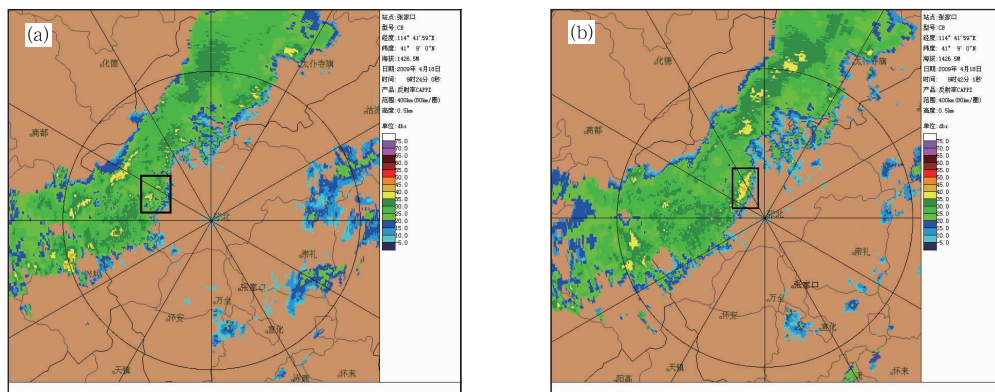


图 6 图 2 中的 M1~M2 时段(a)和 N1~N2 时段(b)CAPPI 图(黑色方框区域)

Fig. 6 CAPPI images; (a) the area in the rectangle corresponds to the period of M1~M2 in Fig. 2, and (b) the area in the rectangle corresponds to the period of N1~N2 in Fig. 2.

域。17:24—17:30 第一次穿过该回波区,飞行高度是 4800 m,根据云的移动速度以及飞机飞行轨迹判断该段没有受到之前作业的影响,因此认为该段是飞机对自然云的观测。而 17:42—17:48 是作业后回穿该区域(图 6b),根据云的移动速度以及飞机飞行轨迹判断所观测的是作业后的效果。

4.1 液态含水量的变化

本次作业的积层混合云具有较为明显的不均匀性。图 7a 和图 7b 给出的是飞行所取得的 FSSP 探

测的液态含水量变化图,催化前飞机位于 4800 m 左右的层状冷云中,液态水含量(LWC)起伏变化很大,有两个相对丰水区。LWC 的第一个大值区出现在 17:25:40—17:26:00,最大值为 $0.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。LWC 的第二个大值区出现在 17:26:34—17:27:00,最大的液态含水量是 $1.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均为 $0.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。说明作业云的云水含量比较丰富。催化后 LWC 平均值降低了一半以上;分布上,催化前是多峰分布,催化后分布比较均匀。

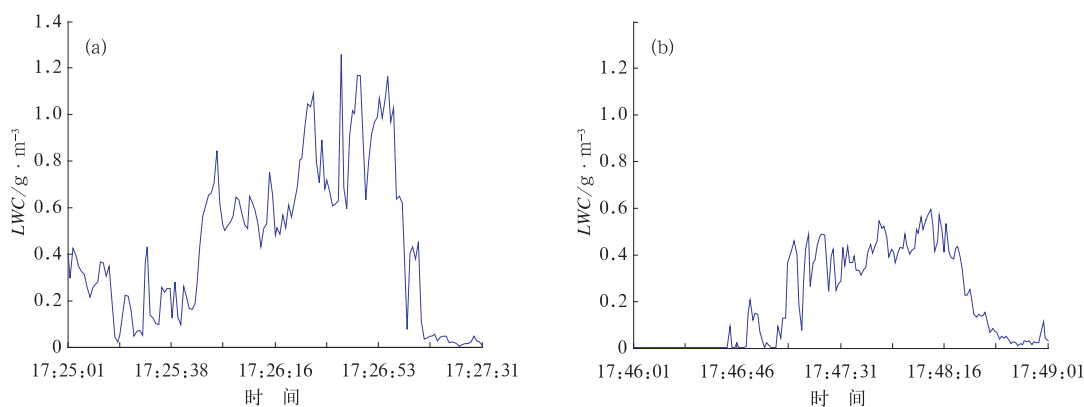


图 7 催化前(a)和催化后(b)LWC 随时间变化曲线

Fig. 7 Time plots of (a) LWC before seeding (M1—M2), and (b) LWC after seeding (N1—N2)

4.2 云滴平均直径以及数浓度的变化

催化前云滴平均直径为 $16.8 \sim 36.4 \mu\text{m}$,平均值是 $20.4 \mu\text{m}$ (见图 8a)。与 LWC 分布形成鲜明的对比,LWC 大值区对应平均直径的小值区,即液态

含水量大的区域是由平均直径 $20 \mu\text{m}$ 左右的小云粒子组成。催化后粒子平均半径增大到 $23.9 \mu\text{m}$ (图 8b)。而数浓度变化趋势与 LWC 变化基本一致,催化后粒子数浓度明显降低了(图 9)。说明催化后大粒子数是增多的,小粒子相对减少。

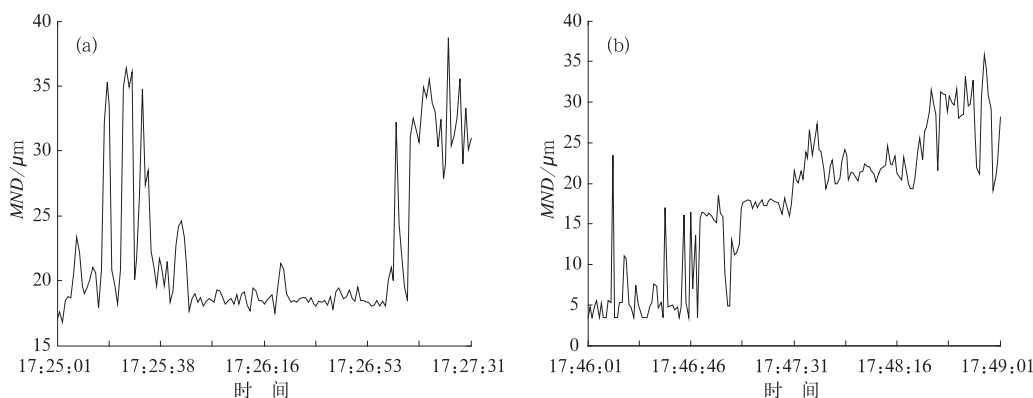


图 8 催化前(a)和催化后(b)粒子平均直径随时间变化曲线

Fig. 8 Time plots of (a) average particle diameter before seeding, and (b) average particle diameter after seeding

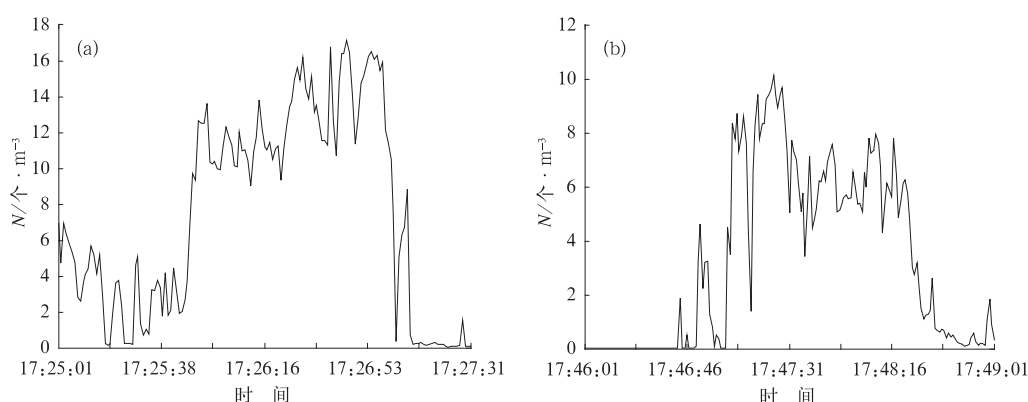


图 9 催化前(a)和催化后(b)粒子数浓度随时间变化曲线
Fig. 9 Time plots of (a) particle number concentration before seeding,
and (b) particle number concentration after seeding

4.3 微物理效应的综合分析

图 10a 为催化前 LWC 峰值前后的云滴谱变化图,可以看出在这个时段云滴是以小云滴为主。催

化后云滴谱总体上趋于平衡的趋势,云滴粒子浓度降低了,尤其 $15\sim 20\ \mu\text{m}$ 区间的粒子降低了一个量级左右。平均的云滴直径在 $20\sim 25\ \mu\text{m}$ 区间,浓度量级在 10^5 左右(图 10b)。

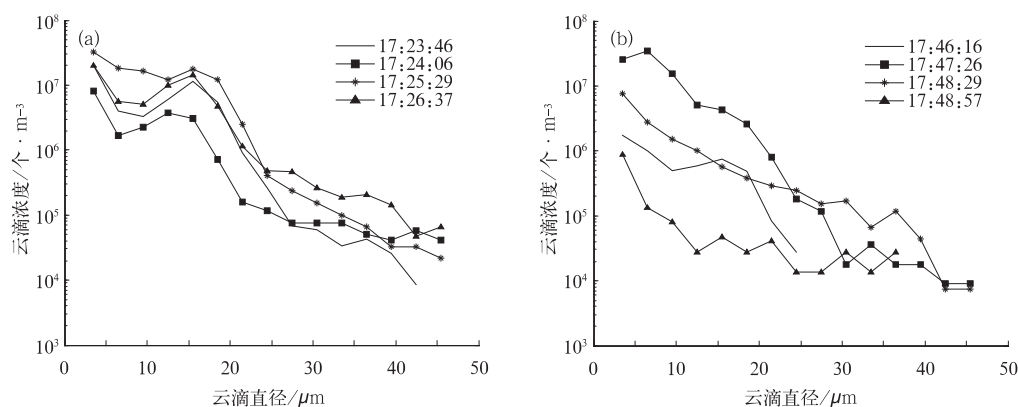


图 10 催化前(a)和催化后(b)时段云滴谱变化
Fig. 10 The changes of (a) cloud droplet spectrum before seeding,
and (b) cloud droplet spectrum after seeding

图 11~12 给出了 4800 m 平飞时段相应的 2D-C 和 2D-P 变化趋势(2D-C 探头测得的粒子是大云

粒子(大云滴和冰雪晶)、2D-P 探头测得的粒子是降水粒子)。由图可见,在 LWC 跃增前后,虽然冰晶

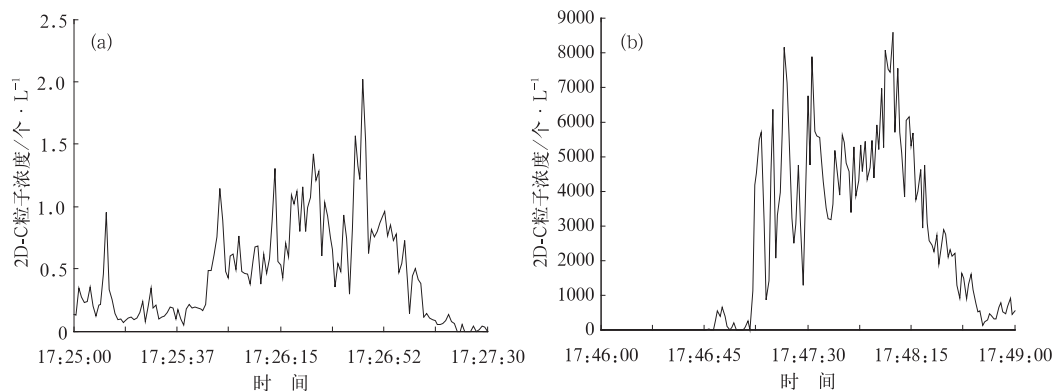


图 11 催化前(a)和催化后(b)2D-C 粒子浓度变化曲线
Fig. 11 Time plots of (a) 2D-C particle concentration before seeding,
and (b) 2D-C particle concentration after seeding

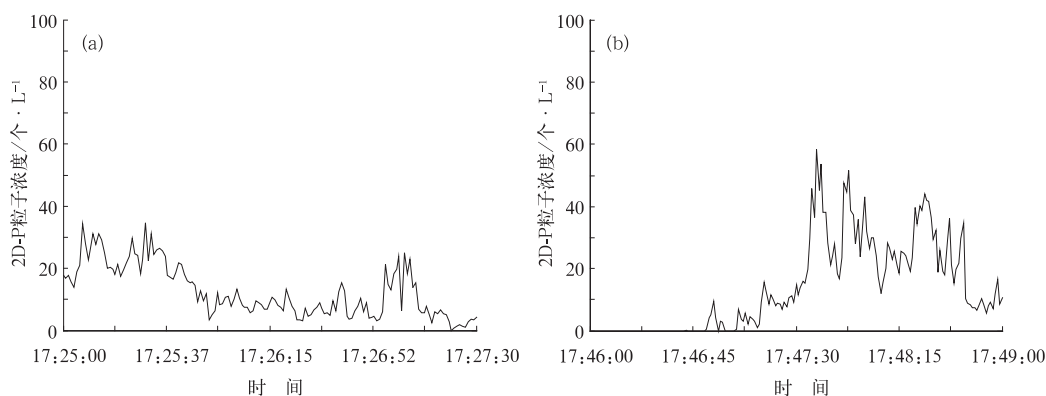


图 12 催化前(a)和催化后(b)2D-P 粒子浓度变化曲线

Fig. 12 Time plots of (a) 2D-P particle concentration before seeding, and (b) 2D-P particle concentration after seeding

和雪晶浓度也出现了相对的峰值,但是量级很低,说明云内冰晶并不是很充足,人工引晶后,降水粒子大量增加,平均值由催化前的 $12.6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $21.1 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

5 地面降雨量分析

人工影响天气播撒作业的空中效应固然重要,但这些效应能否形成地面增雨,还需分析地面降雨量。

根据飞行路线、风向以及云的移动方向判断飞机作业主影响区位于张北以及张家口附近地区,作业开始后,作业影响区逐渐出现不同程度的降水,从加密雨量图 13 可以明显看出:降雨量第一个峰值出

现在作业后 1 小时,最大雨量达到 4.3 mm ,位于张北的白庙滩;第二个峰值出现在作业后 2 小时,即 19 时左右,最大雨量达到 2.4 mm 。这和 Rosenfeld 对德克萨斯州播云实验效果评估的结果基本吻合^[11],即:作业后 2~3 小时,效果就开始出现明显衰减。

6 结 语

对 2009 年 4 月 18 日飞机作业个例 PMS 资料进行分析研究,得到主要结果如下:

(1) 这次作业云具有一定的可播性。FSSP 探测的粒子浓度不小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的云区占很大的比例,同时发现 2D-C 探测的大粒子浓度小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 的强可播区存在。

(2) 4800 m 高度作业前后的云微物理效应对比分析得到, LWC 催化后平均值降低了一半以上;粒子谱分布上,催化前是不连续的多峰分布,催化后趋于平稳分布。粒子平均直径催化后增大到 $23.9 \mu\text{m}$,说明在作业后时段内,大粒子数增多,小粒子相对减少。

(3) 作业改变了云粒子谱结构。催化前是以小云滴为主,催化后云滴谱总体上趋于平衡,云滴粒子浓度降低了,尤其 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 区间的粒子降低了一个量级左右。平均的云滴直径在 $20 \sim 25 \mu\text{m}$ 区间,浓度量级在 10^5 左右。在 LWC 跃增前后,虽然冰晶和雪晶浓度也出现了相对的峰值,但是量级很低,说明的云内冰晶并不是很充足,经过人工引晶后,降水粒子大量增加,平均值由催化前的 $12.6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$

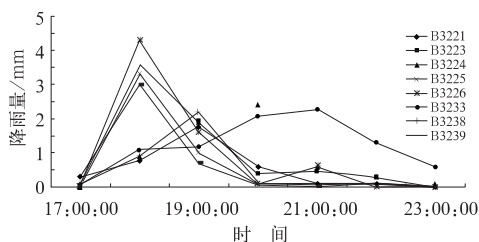


图 13 张北附近站点的降雨量时间变化图

B3221 代表的是两面井(张北);B3223 代表的是小二台(张北);B3224 代表的是油篓沟(张北);B3225 代表的是二台(张北);B3226 代表的是白庙滩(张北);B3233 代表的是大河(张北);B3238 代表的是宇宙营(张家口市);B3239 代表的是沙沟(张家口市)

Fig. 13 Time plots of rainfall at stations surrounding Zhangbei area

Note: B3221 represents Liangmianjing site(Zhangbei), B3223, Xiaoertai (Zhangbei); B3224, Youlougou (Zhangbei); B3225, Ertai (Zhangbei); B3226, Baimiaotan (Zhangbei); B3233, Dahe (Zhangbei); B3238, (Zhangjiakou Urban Areas) and B3239, Shagou (Zhangjiakou Urban Areas)

增加到 $21.1 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(4) 影响区地面降雨量分布图表明,作业后 1 小时降雨量达到最大。最大雨量达到 4.3 mm ,位于张北的白庙滩;第二个峰值出现在作业后两小时,即 19 时左右,最大雨量达到 2.4 mm 。

从此个例分析中可以看出:

(1) 降水过程中的热力和微物理垂直结构是: 650 hPa 、 850 hPa 相对湿度较高, 750 hPa 绝对湿度较高,即水汽含量较多, 850 hPa 到 750 hPa 为逆温层。这种温湿垂直结构可能易使水汽在低层富积形成层云,然后随逆温层破坏而发生对流,演变成层积混合云;上升运动的抬升至 650 hPa 以上相对湿度较高的区域,水凝物粒子抬升到更有利于增长的高度,从而使降水粒子的平均直径增大。

(2) 降水粒子的可能增长机制:催化作业高度处,温度在 $-8 \sim -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,催化前过冷水含量较丰富,且随高度升高而增大,而冰相粒子数目却随高度增加而减少,当通过人工播撒催化剂增加该层冰晶后,产生了更多的雨元冰晶,它们在丰富过冷水的支持下长大成降水粒子,造成地面雨量的增加。看来这次降水粒子是以凝华增长为主的。

参考文献

- [1] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社, 2002:325-356.
- [2] 叶家东,范蓓芬. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京:科学出版社, 1982:110-189.
- [3] 曾光平,吴章云. 人工降水[M]. 福州:福建省科学技术出版社, 1997:34-49.
- [4] 王婉,姚展予. 2006 年北京市人工增雨作业效果统计分析[J]. 高原气象, 2009, 28 (1):195-202.
- [5] 贾玲,陈保国,郭强,等. 人工增雨效果检验统计方案设计[J]. 陕西气象, 2000, 12(5):12-13.
- [6] 姚展予,许晨海,肖辉,等. 用区域控制法评估 1997 年青海省河南县人工增雨效果[J]. 气象学报, 2005, 63 (增刊):100-104.
- [7] 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.
- [8] Hess, W. N 著,王昂生,等译. 人工影响天气和气候[M]. 北京:科学出版社, 1985: 316-343.
- [9] 刘卫国,苏正军,王广河,等. 新一代机载 PMS 粒子测量系统及应用[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊):11-18.
- [10] Woodley W, D Rosenfeld, B Silverman. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in thailand. Part I: The Demonstration experiment[J]. J Appl Meteor, 2003, 42: 920-938.
- [11] Woodley W, D Rosenfeld, B Silverman. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part II: Exploratory analyses[J]. J Appl Meteor, 2003, 42: 939-951.
- [12] Rosenfeld D, W Woodley. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud-seeding programs in texas[J]. J Appl Meteor, 2004, 43: 249-263.
- [13] 陶树旺,刘卫国,李念童,等. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增刊): 14.
- [14] 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等. 河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J]. 高原气象, 2005, 2(24): 84-90.
- [15] 于丽娟,姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象, 2009, 35(10):8-24.
- [16] 张嵩,何晖,刘建忠,等. 北京 2008 年奥运会开幕式人工消减雨作业[J]. 气象, 2009, 35(8):3-15.
- [17] 彭亮,姚展予,戴进,等. 河南春季一次云降水过程的宏微观物理特征分析[J]. 气象, 2007, 33 (5):3-11.
- [18] 刘卫国,李淑日,马培民,等. 机载 PMS 粒子测量系统实时处理显示技术系统的研制[J]. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 169-172.