doi:10.11676/qxxb2017.049 气象学报

华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微物理特征与催化响应分析*

秦彦硕[1] 蔡 淼[2] 刘世玺[3] 蔡兆鑫[4] 胡向峰[1] 吕 峰[1]
QIN Yanshuo[1] CAI Miao[2] LIU Shixi[3] CAI Zhaoxi[4] HU Xiangfeng[1] LÜ Feng[1]

1. 河北省人工影响天气办公室,石家庄,050021
2. 中国气象科学研究院,北京,100081
3. 中国气象局综合观测司,北京,100081
4. 山西省人工降雨防雹办公室,太原,030002
1. *Weather Modification Office of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021, *China*
2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
3. *Department of Integrated Observations of CMA*, *Beijing* 100081, *China*
4. *Weather Modification Office of Shanxi Province*, *Taiyuan* 030002, *China*
2016-07-14 收稿,2017-05-03 改回.

秦彦硕,蔡淼,刘世玺,蔡兆鑫,胡向峰,吕峰. 2017. 华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微物理特征与催化响应分析. 气象学报,75(5):835-849

Qin Yanshuo, Cai Miao, Liu Shixi, Cai Zhaoxi, Hu Xiangfeng, Lü Feng. 2017. A study on macro and micro physical structures of convective-stratiform mixed clouds associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(5):835-849

Abstract Making use of the Particle Measuring System (PMS) observations collected in the middle-upper stratocumulus clouds over Laiyuan in Zhangjiakou region on 13 October 2013, the vertical microphysical structure, the seedability of clouds and the variation of total number concentrations of liquid cloud particles, ice crystals and precipitation particles are analyzed. The results show that the clouds have a cold-warm structure with a dry layer and a deep cloud layer. The average value of cloud particle concentrations in cold clouds is 62 cm^{-3} and the max value of liquid water content is 0.05 g/m^3. The mean concentrations of ice crystals and precipitation particles detected by 2DC and 2DP are 1.9 L^{-1} and 2.2 L^{-1}, respectively. The average value of cloud particle concentrations in warm clouds is 300 cm^{-3}, and the value of liquid water content is 0.1 g/m^3. The horizontal distribution of cloud particle concentrations in the study area is very uneven. Using the value of liquid water content and the mean concentration of ice crystals to identify cloud seeding ability, it is found that stratiform clouds are the most seedable. By comparing the average concentration and diameter of cloud particles before and after the seeding, the results show that the average concentration of cloud particles before the seeding is 31 cm^{-3}, which is much higher than that after the seeding (17.6 cm^{-3}). But the average diameter has little change. After seeding, ice crystals can grow by consuming the supercool water. The concentration of ice crystals increased from 0.86 L^{-1} to 4.27 L^{-1}, and the mean diameter also increased to 550 μm. Ice crystal particles gradually grew, and precipitation particle concentration also increased and the particle spectral broadened.

Key words Convective-stratiform mixed cloud, Microphysical characteristics, Microphysical structure and responses, Particle Measuring System (PMS)

---

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206025)、河北省气象局科研开发项目(15ky20)、中国气象科学研究院基本科研业务项目(2014Y008)、国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2013CB955802)。
作者简介:秦彦硕,主要从事云降水物理和气溶胶研究。E-mail: qys122006@126.com

摘 要 利用2013年10月13日机载粒子测量系统(PMS)在张家口涞源地区对积层混合云中上部进行的增雨探测数据,分析了云的垂直微物理结构、云区的可播性和作业前后液态云粒子、冰晶及降水粒子的微物理变化。结果表明,此次降水性积层混合云的垂直结构由冷、暖两层云配置,云层发展厚实,冷云区云粒子浓度平均为62 cm^{-3},液态水含量最大0.05 g/m^3;2DC和2DP探测的冰晶及降水粒子平均浓度分别为1.9和2.2 L^{-1};暖云内云粒子数浓度集中在300 cm^{-3}左右,液态水含量约0.1 g/m^3。探测区域云粒子数浓度的水平分布不均匀。利用云内过冷水含量和冰晶浓度等参数判断,该降水性积层混合云的播撒作业层具有强可播性。对比作业前后云中粒子浓度及平均直径发现,云粒子在作业前时段内的平均浓度为31 cm^{-3},远高于作业后平均浓度(17.6 cm^{-3});但平均直径变化不大。作业后冰晶粒子通过贝吉龙过程消耗过冷水长大,浓度由之前的0.86 L^{-1}增至4.27 L^{-1},平均直径也增至550 μm。冰晶粒子逐渐长大形成降水,降水粒子浓度也相应有所升高,谱明显变宽。

关键词 积层混合云,微物理特征,催化响应,粒子测量系统(PMS)

中图法分类号 P401

1 引 言

层状云是一种主要的大范围降水云系,尤其层状冷云,是中国北方人工增雨的主要作业对象,准确认识和掌握降水性层状云微物理特征具有重要的科学和现实意义(赵震等,2008)。近年来,中外开展的多项大型试验,均利用了高时、空分辨率的机载粒子测量系统(PMS)探测设备对层状云的微物理特征进行研究。如McFarquhar等(2007)在混合相态冰云实验(MPACE)中利用机载粒子测量系统探测设备对冰、水混合相态的云进行微物理探测研究。朱士超等(2014)利用环北京地区的3架飞机对华北地区积层混合云进行联合探测,结果表明,云顶温度、云中所处位置等因素均对云内冰晶的形状、分布及增长有影响。王黎俊等(2013a)利用机载粒子测量系统研究了三江源地区秋季典型多层层状云系的微物理特性,发现不同高度的云层云粒子浓度及过冷水含量均有较大差异,但粒子谱分布类似。

同样,对华北地区层状云系的微物理研究亦颇多(李铁林等,2010;邓育鹏等,2013;周黎明等,2014)。而研究降水性层状云系微物理特征的目的均是为了更好了解云系中过冷水的分布规律及云系的可播性指标,从而可更好地开发华北地区空中云水资源,缓解该地区干旱缺水的状况,因此,有必要对每一次催化作业进行科学设计飞行方案,并对催化效果进行初步分析。人工催化效果检验方面的研究,国际上主要针对冬季地形云进行了一系列科学实验,如Solak等(2003)采用回归技术估计20多年来的催化对下风向目标区域降雨影响,结果表明催化影响下风向估计可达150 km,降水增加量约为14%。Geerts等(2010)利用机载多普勒雷达研究地基碘化银对冬季地形云降雪催化的影响,发现催化后探测到的近地面雷达反射率有所增大,降雪率得到提高。中国很多地区通过雷达、卫星、雨量及机载探测等多种途径开展人工催化效果的实验研究。汪玲等(2015)利用新一代天气雷达三维拼图和最大相关系数的雷达回波跟踪方法(TREC),实时跟踪作业前后回波,通过计算区域内各种回波参数的变化,来分析人工增雨效果。还可通过分析作业前后卫星反演的光学厚度、云顶温度等参数变化来评估作业效果(李宝东等,2014)。王以琳等(2003)在山东进行了冷云人工引晶试验,并在引晶扩散带中观测到了冰雪晶浓度升高和粒子谱展宽的现象。王黎俊等(2013b)、蔡兆鑫等(2013)通过对比分析作业前后飞机航迹上探测的云粒子、冰晶浓度变化,研究了催化的微物理响应,发现过冷水含量较高的地区,催化效果较为明显。

近两年来,层状云飞机增雨作为一项业务在中国逐步开展起来,而如何使增雨作业更科学、更有效这一问题显得极为重要。因此,有必要对层状云系人工增雨作业条件识别和效果分析进行精细化研究,推动中国层状云人工增雨业务化的发展。本研究首先分析了2013年10月13日飞机探测的一次降水性积层混合云的宏、微观物理特征,在科学设计飞行探测方案的基础上,探讨云系的可播性及作业前后云中粒子的微物理变化,为人工增雨效果的检验提供一定的微物理依据。

2 探测仪器及资料处理方法

2.1 探测仪器简介

探测设备为夏延Ⅲ飞机搭载的粒子测量系统(刘卫国等,2003),其中云粒子测量采用FSSP-100-ER探头(简称FSSP),其测量粒子直径范围为1—95 μm,分4个量程,每个量程内等分15个测量通

道,有效采样面积为 0.310 mm^2,可直接测量运动速度为 20—125 m/s 的粒子。本次探测主要针对降水性层积云,故采用量程 1(2—47 μm),最小分辨率为 3 μm。OAP-2D-GA2 探头(简称 2DC)主要探测直径为 25—1550 μm 的粒子大小、二维图像等信息,分辨率为 25 μm,可测量运动速度为 10—100 m/s 的粒子。OAP-2D-GB2 探头(简称 2DP)主要探测直径为 150—9300 μm 的云中粒子特别是降水粒子的大小、二维图像等信息,分辨率为 150 μm,可测量运动速度为 10—100 m/s 的粒子。取样时间均为 1 s。

此外,飞机上还安装了温度计、露点仪和 GPS 等设备,可得到相应时刻的温度、气压、高度等资料。飞行期间的宏观记录可提供有关云的宏观天气现象及平飞阶段测量的高空风等信息。

2.2 数据处理及质量控制

机载粒子测量系统中的光阵探头包括一维和二维,测量误差均来自两个方面:粒子尺寸的测量误差和粒子计数的误差(赵增亮等,2010)。而在粒子浓度<500 cm^{-3} 的情况下,新型 FSSP 测量的粒子直径误差可控制在 3%—7%(Coelho, et al,2005),因此,文中暂不考虑 FSSP 的测量误差。2DC 在较小粒子段(直径小于 125 μm)的定量化浓度有一定的误差 (Baumgardner, et al,1997; Strapp, et al,2001)。McFarquhar 等(2004, 2007)处理 2DC 资料采用方法是,FSSP 有观测资料时,取 2DC 中 $D_j \geqslant 54.88$ μm 的数据进行处理。参照以往的方法,文中 2DC 的前两通道(即 $D_j \leqslant 54.88$ μm)资料舍弃,进行分析。

为减少各探头测量的不同通道粒子数浓度因存在量级上的差异而出现的数据波动和不稳定现象,各类参量的垂直阶段分析采用 50 m 平均,平飞阶段采用 10 s 平均进行分析。

2.3 云的界定和云粒子参数的计算方法

关于云区判断标准有很多,Yum 等(2002)采用粒子总数浓度大于 10^6 m^{-3} 为阈值确定云区;Hobbs(1991)提出,当利用 FSSP 探头观测到云中大于 2 μm 的粒子总浓度超过 10^7 m^{-3} 时,看作云水区。文中当 FSSP 探头观测的云粒子 $N_1 \geqslant 10^7$ m^{-3}、计算含水量(LWC)≥0.001 g/m^3 时则判定云的出现。文中云粒子数浓度 N、数密度 n_i、平均直径 D_m、体积平均直径 D_v 等参量计算式为

$$N = \sum N_i \tag{1}$$

$$n_i = N_i / \Delta D_i \tag{2}$$

$$D_m = \sum (N_i D_i)/N \tag{3}$$

$$D_v = ((\sum N_i D_i^3)/N)^{1/3} \tag{4}$$

式中,N_i 为 i 通道粒子的数浓度(m^{-3}),n_i 为 i 通道粒子的数密度($m^{-3} \cdot \mu m^{-1}$),D_i 为 i 通道粒子的中值直径(μm),D_m 为粒子的平均直径(μm),D_v 为粒子的体积平均直径(μm)。

文中 FSSP 探头探测的云粒子数浓度简称 N_1,平均直径为 D_1,计算液态含水量为 LWC;2DC 探测的云及降水粒子数浓度 N_2,平均直径为 D_2;2DP 探测的降水粒子数浓度 N_3,平均直径为 D_3。

2.4 飞行概况

飞机于 2013 年 10 月 13 日 19 时 40 分(北京时,下同)从河北正定机场起飞,开始垂直爬升阶段,至曲阳上空 2500 m 入云,3900 m 高度温度降至 0℃;20 时 06 分到达涞源,选择积层混合云的中上部即水平高度 5100 m,开始自西向东作南北向"耕作飞行"播撒作业,播撒和探测同时进行;探测作业区域东西约 60 km,南北约 80 km。21 时 15 分播撒作业停止,随后进行自北向南作东西向"S"形回穿探测,22 时 35 分开始返航(图 1)。

在整个飞行探测阶段区,未受到作业催化影响和受作业影响时段,仅以环境风场的水平输送为判断条件,暂不考虑催化剂的扩散和因核化可能引起的剂量衰减等复杂因素的影响(余兴等,2002;王黎

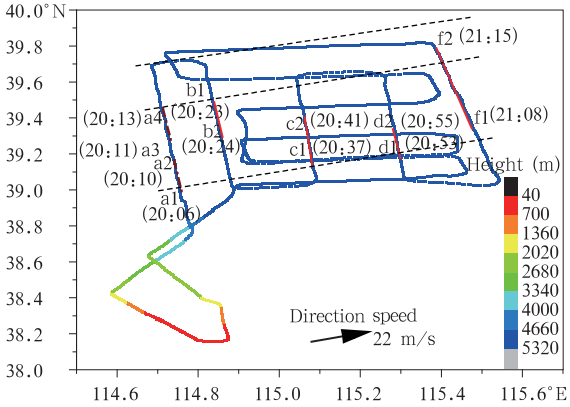


图 1 飞行轨迹随高度的演变
(虚线代表风向)

Fig. 1 The trajectory of the aircraft and flight height variation during the whole experiment
(the dotted line shows the wind direction)

俊等,2013b)。根据20时气象探空站资料和飞机宏观记录5100 m高空风向风速共同显示,探测区域高空风的风向为西西南,风速22 m/s。探测资料显示飞机在平飞探测阶段飞行速度约100 m/s,飞机从a1点开始播撒作业,飞行轨迹上的催化剂以22 m/s速度沿着风向(图1中虚线)输送扩散。催化剂从a1点出发沿风向输送过程中,势必会影响下风方飞行轨迹。根据飞机飞行速度和催化剂扩散速度综合计算,飞机飞行至c1—c2时段,刚好受到上风方向即西侧轨迹a1—a2段播撒催化剂的影响,即此时a1—a2段轨迹的影响范围到达c1—c2位置(图中红色涂线位置),即判断c1—c2段为作业影响时段,而a1—a2段为作业前探测时段。按照此方法依次判断出,整个探测阶段中未受到作业影响的时段有a1—a2段,定义为作业前时段,对应的下风方受到催化作业影响、且与飞机轨迹重合的时段有c1—c2、d1—d2及f1—f2段;同理a3—a4段也为作业前时段,对应的下风方受到催化作业影响且与飞机轨迹重合的时段有b1—b2段。

3 云宏观结构特征

从10月13日12时—14日08时FY-2F卫星连续演变的红外云图(图略)中可看出,云系主体呈东北—西南带状分布,位于探测区域的北部,13日15时开始影响河北北部,在东移过程中逐渐加强,带宽增宽,其中夹杂发展较强的云团,为积层混合云结构。20时的FY-2F卫星红外云图(图2a)显示,探测区域内均为云顶温度-20—-30℃的积层混合云。

受高空槽和地面冷锋的共同影响,13—14日河北中部地区出现了一次大范围的积层混合云降水过程,来自中国南海的偏南暖湿气流源源不断地输入,为降水的形成和发展提供了必要的水汽条件。其中,13日20时500 hPa的高空槽位于内蒙古中东部,之后随系统向东南方向移动过程中逐渐影响河北北部;700 hPa的高空槽开始影响河北张家口地区;地面受冷锋云系影响,以西南风为主。从天气形势图上看,探测期间(19时40分—22时57分)探测区域正好受到冷锋过境的影响(图2a)。

根据地面逐时雨量显示(图略),13日14时在探测区域出现零星小雨,15时出现大范围降水,降水带呈现东北—西南走向,雨量逐渐增强,探测期间(图2b)雨量达到小雨量级;14日04时雨量开始有所减少,并逐渐移出探测区域,15日00时降水停止。

北京探空站距飞行探测区域约100 km,且均处于主体云系的南部。10月13日20时北京探空资料显示,云层发展深厚,0℃层位于3053 m,在3000—12000 m出现9000 m深厚的云层,1500 m以下出现低云区,两层云之间有1500 m厚的夹层。在0℃层以下盛行西北风,风速较低,约5—9 m/s;随高度升高,逐渐转为西风,风速也有所增大。从20—22时飞行探测区域的雷达回波演变(图略)可看出,回波主体呈东北—西南带状分布,20时探测前该区域的雷达回波大多大于15 dBz,个别区域最大可达30 dBz(图3a)。21时雷达回波明显加强,带

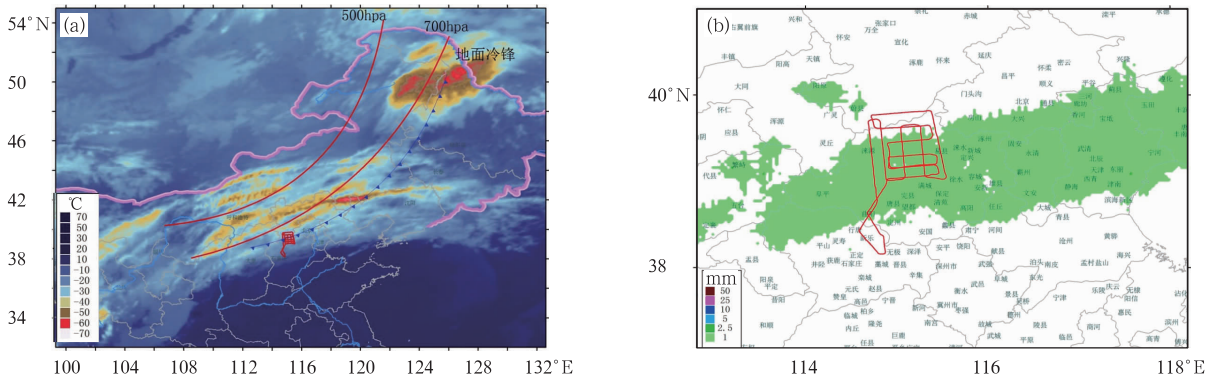


图2 10月13日20时FY-2F红外云图(a)和雨量(b)

(红线为飞行轨迹)

Fig. 2 FY-2F infrared cloud images (a) and rain (b) at 20:00 BT 13 October

(The red line shows the trajectory of the aircraft)

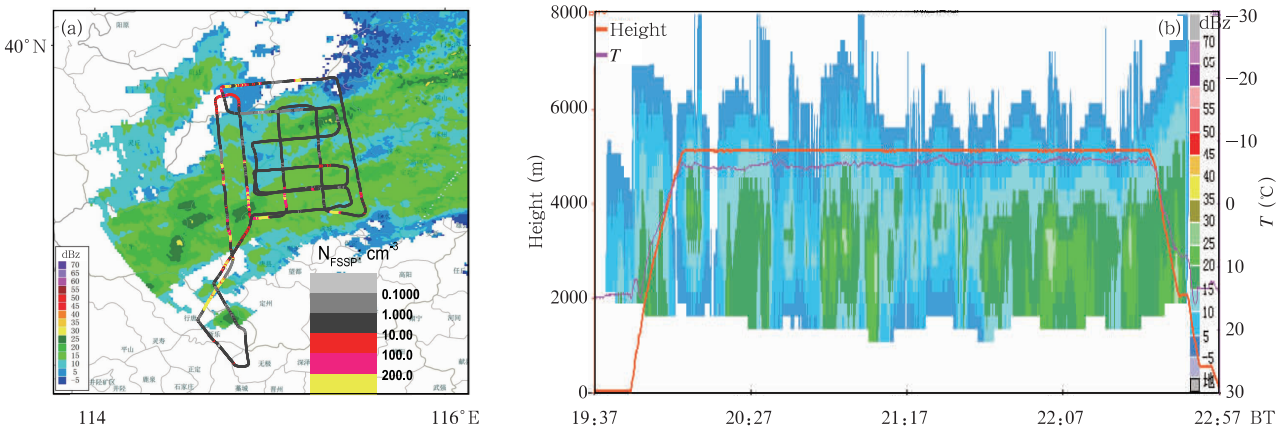


图 3 10 月 13 日 20 时飞行轨迹上的雷达回波水平分布(a,飞机轨迹上叠加了云粒子浓度)及沿飞行轨迹上雷达回波垂直剖面(b)

Fig. 3 Horizontal distribution of radar PPI echo at 20:00 BT 13 October (a, cloud particle concentration is superimposed on the aircraft trajectory) and vertical cross-section of radar echoes along the aircraft flight trajectory (b)

状特征更为显著,大于 25 dBz 的强回波面积扩大。22 时的雷达回波连成一片,强回波有向南发展的趋势。分析发现,FSSP 探测到的云粒子数浓度在整个云区内的水平分布差异较大,其中探测最大数浓度可达 429 cm^{-3}。飞行探测高度(5100 m)对应的雷达回波主要为 5—15 dBz(图 3b)。

4 云微观结构特征分析

4.1 FSSP 探测的云粒子相态分析

FSSP 所测含水量易受其量程内冰晶的影响(胡志晋,2001)。FSSP 探测的云粒子相态与数浓度、直径有很大关系。Cober 等(2001a,2001b)在加拿大冻雨试验中发现,混合态云中冰晶粒子的平均直径大于 30 μm,而液态小云粒子平均测量直径小于30 μm 的占主要成分;Korolev 等(2003)对锋面层状云系研究认为,液态过冷水云中的平均体积直径为 10—12 μm,冰云中的平均体积直径为 20—35 μm。在液态水云和冰水混合态云中,对液态水含量的测量比较精确的是 King 探头(McFarquhar, et al, 2007)。王黎俊等(2013b)对三江源秋季的层积云研究认为,探测的液态云粒子集中在中值直径 3.5—18.5 μm,21.5—45.5 μm 的云粒子基本上为冰晶,粒径大于 50 μm 的粒子为冰相粒子。根据王黎俊等(2013b)数据资料,重新做了统计,得出以下规律:LWC_{FSSP} 和 LWC_{king} 数值接近时,对应的 $N>10$ cm^{-3},$D_m<10$ μm;LWC_{FSSP} 大于 LWC_{king} 时,对应的 $N<10$ cm^{-3},$D_m>10$ μm(表 1)。

表 1 层积云顶部探测的不同区云粒子数浓度与平均直径分布

Table 1 Distributions of cloud particle concentration and the mean diameter above the stratocumulus

分类	LWC> 0.01 g/m^3	N(cm^{-3})	D_m(μm)	规律
$LWC_{FSSP}=LWC_{king}$	L1	10.8	8.1	$N>10$ cm^{-3} $D_m<10$ μm
	L3	11.5	6.4	
	L4	30.9	6.9	
	L7	21.1	7.9	
	L13	31.4	6.6	
$LWC_{FSSP}>LWC_{king}$	L2	8.8	10.2	$N<10$ cm^{-3} $D_m>10$ μm
	L5	7.9	11.5	
	L6	9.9	10.1	
	L8	8.0	10.1	
	L9	9.6	12.4	
	L10	5.7	17.1	
	L11	4.6	17.3	
	L12	5.0	16.6	

注:数据来源于王黎俊等(2013b)。

综合以往的判别标准,给出了本次飞行阶段 FSSP 探测的负温区内云粒子数浓度与平均体积直径、算术平均直径的关系(图 4)。结果表明,当 $N<10$ cm^{-3},云粒子体积平均直径 D_v 最大达到 25 μm,说明存在一定比例的冰晶粒子,此时 FSSP 探测的云粒子谱计算 LWC 可能会高估过冷水含量。当云

区 $N \geqslant 10\ \mathrm{cm}^{-3}$ 时,99%以上的云粒子体积平均直径 $D_v < 12\ \mu\mathrm{m}$,100%的云粒子算术平均直径 $D_m < 10\ \mu\mathrm{m}$;即本次飞行阶段 FSSP 探测的云区的云粒子为液态云粒子。

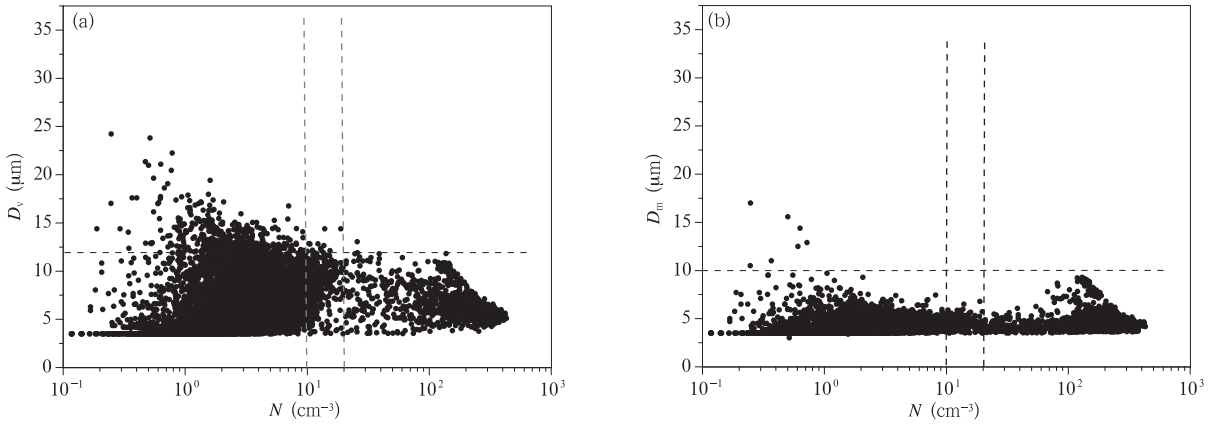


图 4 整个飞行阶段负温区 FSSP 探测的云粒子数浓度与平均体积直径(a)、算术平均直径(b)的关系

Fig. 4 Correlations of concentration with volumetric diameter (a) and arithmetic mean diameter (b) of cloud droplets during the level flight ($T<0$℃)

4.2 云微物理量垂直分布特征

飞机从正定机场起飞即开始做垂直探测,至 5100 m 高度时斜飞探测的水平距离约 40 km,得到了从地面至 5100 m 高度范围的云系垂直结构和云中微物理量的垂直分布(图 5)。从温度随高度的变化廓线(图 5b)可以看出,800—1300 m 高度存在一个明显逆温层,逆温层上部温度与高度成线性递减,从 15℃降至 −6.5℃(5100 m),平均温度梯度 $\Gamma = -\Delta T/\Delta H = 0.57$℃/(100 m),0℃高度为 3900 m。

以 FSSP 探测到的云滴数浓度 $N_1 \geqslant 10\ \mathrm{cm}^{-3}$、计算含水量 LWC≥0.001 g/m^3 时为入云标准判断,云滴浓度垂直分布呈多峰结构(图 5a)。而云系的垂直结构由冷、暖两层云组成,云层发展厚实,中间有薄的干层,符合"播种-供应"云微物理结构(洪延超等,2005)。4000—5100 m 为冷云区,云内温度为 −1.5— −6.5℃,冷云的下部云系稀薄。云粒子浓度 N_1 平均值为 62 cm^{-3};最大值 253 cm^{-3},出现高度在 4680 m,粒径最大为 6.6 μm,液态水含量最大 0.05 g/m^3。2DC 探头探测的粒子可能由冰晶、霰粒子和大云滴组成,平均浓度为 1.9 L^{-1},平均粒径 112 μm。2DP 探头探测的降水粒子主要分布在冷云区的中下部,平均浓度为 2.2 L^{-1},最大值为 4.8 L^{-1},平均粒径 860 μm。

3600—4000 m 有一干层,干层内观测到了极少数的云粒子和降水粒子,可能是冷云区的冰晶或云滴掉落,并在干层内蒸发造成的。

在 2400—3550 m 范围存在一厚度 1000 m 的暖云,FSSP 探测到云粒子数浓度 N_1 约集中在 300 cm^{-3},液态水含量处于 0.1 g/m^3 附近,暖云云底 200 m 高度处的云粒子直径为 4 μm,随高度增大,云粒子不断凝结增长,平均粒径最大达到 6 μm。2DC 探头在暖云区(2400—3550 m)探测的粒子主要由大云滴组成,也可能有上层掉落下来的冰雪晶粒子(图 5c),粒子大小比较均匀,平均直径为 52 μm,N_2 平均 0.13 cm^{-3},云层中部云粒子 N_2 最大,由碰并过程或冰雪晶粒子融化而来。粒子长到足够大时,云中上升气流无法承受其继续向上运动到达云顶部,便下落形成降水,2DP 探头观测(图 5d)的暖云中下部降水粒子浓度峰值也证实了这一点。

近地面 700 m 高度附近,逆温层的下部观测到一层稀薄的云,云粒子浓度 N_1 仅为 20 cm^{-3},降水粒子浓度 N_3 最大为 4.2 L^{-1},说明地面开始出现降水。

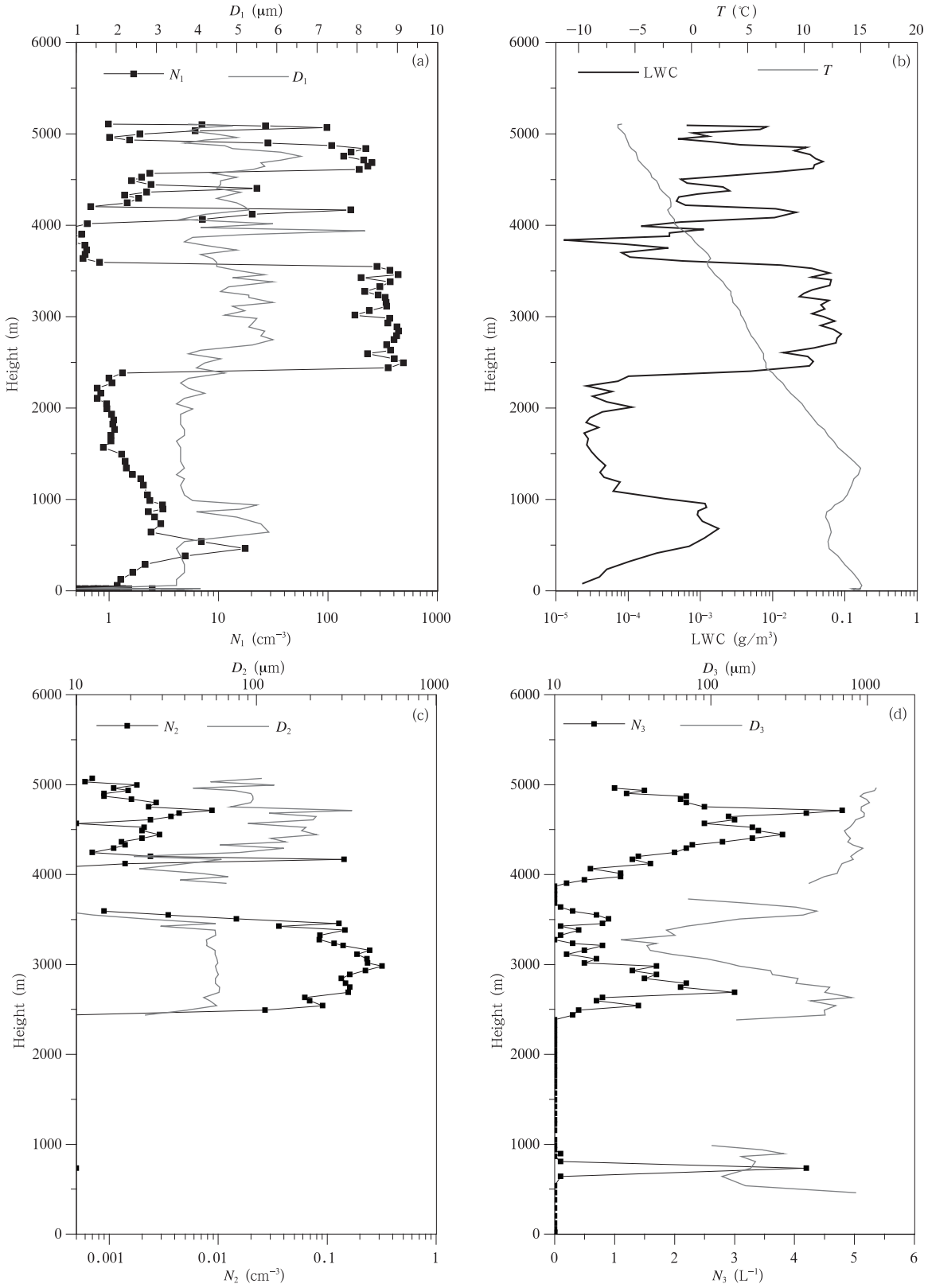


图 5 垂直探测飞行时云粒子数浓度、平均直径(a. FSSP, c. 2DC, d. 2DP)及计算含水量、温度(b)随高度分布

Fig. 5 Vertical distributions of concentration and arithmetic mean diameter of stratus cloud droplet (a. FSSP, c. 2DC, d. 2DP) and the value of liquid water content and temperture (b)

4.3 云微物理量水平分布特征

图6给出了飞机在云上部5100 m高度FSSP、2DC和2DP探测的粒子浓度、平均直径和液态水含量等云微物理量随时间的演变,图7分别给出了探测和催化影响不同时段各探头粒子浓度等变化。首先,FSSP观测的云粒子浓度 N_1 在整个云区内的水平分布差异较大。在云区内 N_1 的高值区主要集中在 10^2 cm^{-3}量级,最大浓度为430 cm^{-3};N_1 的高值区对应的云中液态水含量也高。其次,整个云区云粒子平均直径变化不大,在4 μm上下浮动;当液态水含量出现高值时,平均直径 D_1 会对应出现一些零散的5 μm以上的云粒子,最大值为9.3 μm。从21时30分开始,云粒子 N_1 则在10 cm^{-3}附近波动,整体呈现浓度降低的现象。

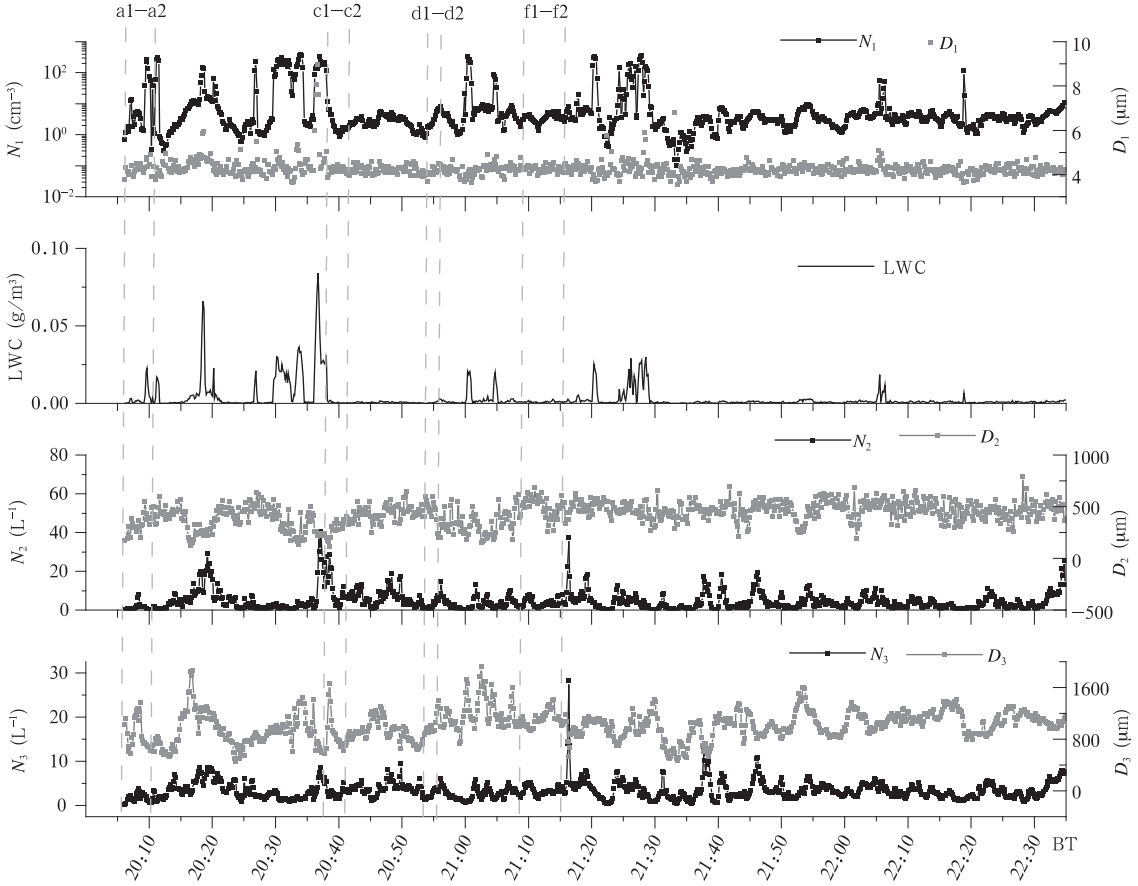


图6 积层混合云平飞阶段各微物理量的演变

Fig. 6 Evolutions of convective-stratiform mixed cloud microphysical parameters during the level flight

2DC探测的粒子浓度 N_2 在整个云区内主要集中在0.1—10 L^{-1},同时也存在几个大于20 L^{-1}的高值区,最大浓度约40 L^{-1};D_2 在200—1000 μm均有分布。其次 N_2 数值分布与 D_2 呈现明显的反相关,尤其是在 N_2 的几个峰值区域,对应 D_2 处于低值区,均小于300 μm。2DP探测的降水粒子浓度 N_3 分布没有大的变化,主要集中在0.1—10 L^{-1};D_3 变化较大,在400—2200 μm波动。

此外,作业前a1—a2时段内绝大部分区域云粒子 N_1 均处于高值区,液态水含量也达到0.01 g/m^3;作业后c1—c2、d1—d2和f1—f2时段内的云粒子 N_1 则处于1—10 cm^{-3},云中液态水含量也被消耗而明显降低,2DC、2DP探测的粒子浓度较作业前a1—a2时段较高。

从图7中看出,a1—a2探测时段中,从20时09分开始,飞机进入深厚云区,云粒子数浓度 N_1 维持在100 cm^{-3}以上。此时2DC探测的冰晶浓度 N_2 较低,粒径较大,主要由较少柱状和霰粒子组成(图8a、b)。随着云中含水量升高,2DC图像显示冰晶粒子形状趋于球形(图8c、d)。催化影响c1—c2时

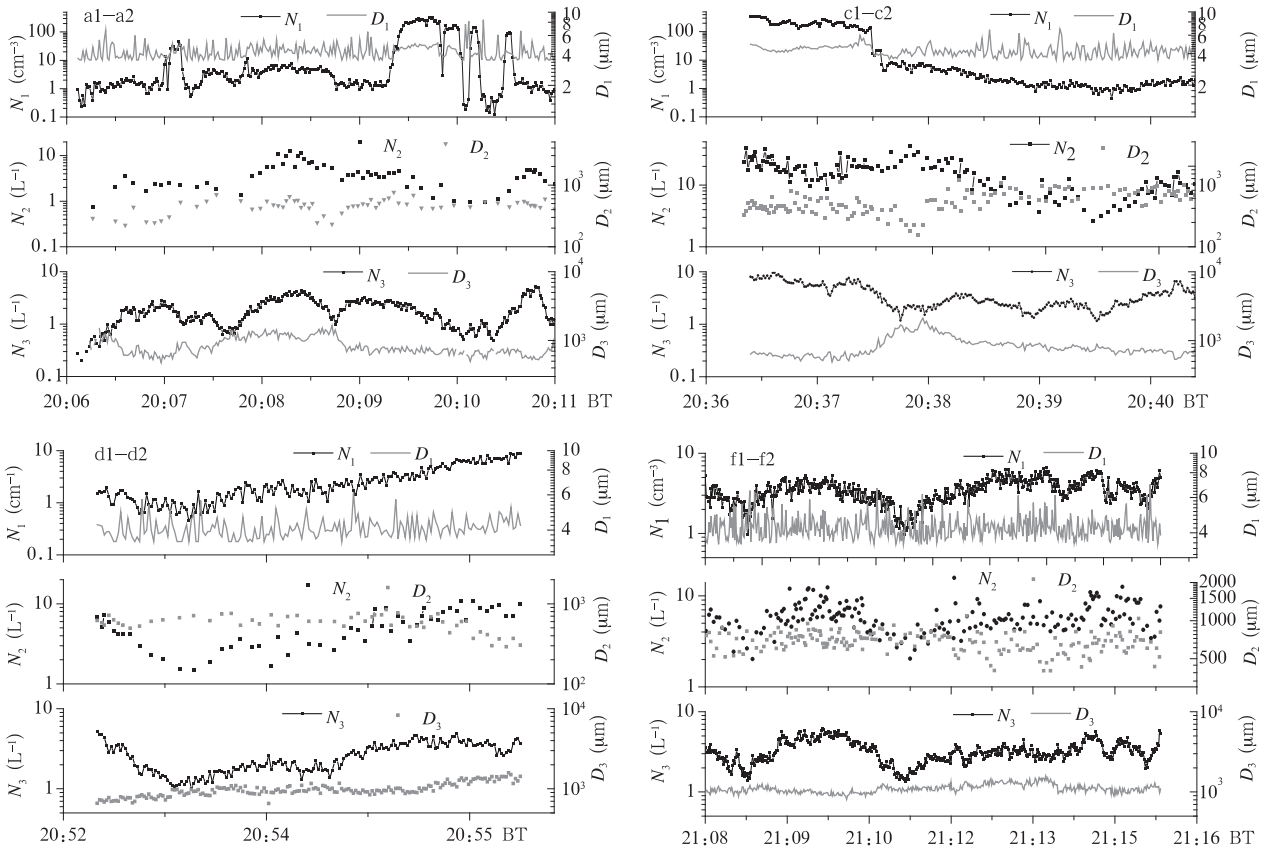


图 7 探测和催化影响时段各微物理量的演变

Fig. 7 Evolutions of stratus microphysical parameters during the probe and the seeding time

段 20 时 37 分 30 秒开始,FSSP 探测的云粒子数浓度急剧下降,通过贝吉龙过程吸收过冷水形成大量冰晶,造成冰晶数浓度增加,粒径较小,此时以球形为主(图 8e);随过冷水含量减少,大量小冰晶通过碰并-淞附过程形成较大的霰粒子(图 8f、g)和雪花(图 8h),数浓度减少,粒径增大。催化影响 d1—d2 时段和 f1—f2 时段云中含水量较少,冰晶以霰粒子为主(图 8i—l)。

4.4 层状云可播性分析

陶树旺等(2001)在综合分析河南地区层状冷云微物理特征基础上,提出了飞机云物理观测识别云可播条件的方法,即 FSSP 探测的粒子浓度不小于 20 cm^{-3}的云区才具有一定的可播性,其中 2DC 探测的粒子浓度 N_2 小于 20 L^{-1}时,可确定为强可播区,否则为可播区。孙鸿娉等(2011)提出了华北层状冷云可播度的两项主要指标,CDP 探测的粒子浓度不小于 30 cm^{-3}的云区才具有一定的可播性,其中 CIP 探测的大粒子浓度小于 10 cm^{-3}时,可确定为强可播区。

华北地区层状冷云有一定的共性,所以在以往研究基础上,综合 4.1 节 FSSP 探测云粒子相态分析结论,可判定此次飞行个例中探测云区的云粒子为液态云粒子,适合对平飞过程云的可播性进行分析。云中粒子谱反映了粒子浓度与尺度的关系,云型不同粒子谱不同,同一云型不同个体粒子谱不同,同一云中不同部位的粒子谱也会不同(陶玥等,2007)。选取不同时刻观测的云粒子平均谱进行对比分析(图 9),总体看粒子谱分布符合负幂指数的单调递减规律。但对于 a 时段,FSSP 探头探测的云粒子浓度 N_1 平均为 199 cm^{-3},谱浓度最大值为 47 cm^{-3} · μm^{-1},表明云中具有丰富的过冷水含量,而 2DC 探测的粒子浓度 N_2 仅为 1.2 L^{-1},说明自然冰晶浓度较低,即云具有很强的可播度。在 b 时段,FSSP 探头探测的云粒子浓度 N_1 为 189 cm^{-3},2DC 探测的粒子浓度 N_2 为 27 L^{-1},表明云中虽有丰富的过冷水,但自然冰晶浓度并不低,说明云具有可播性,但播撒效果并不会很强。在 c 时段,FSSP 探头探测的云粒子浓度 N_1 仅为 2.8 cm^{-3},最大谱浓度

仅为 3.3 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$;2DC 探测的粒子浓度 N_2 为 5.9 L^{-1},表明云中未达到过冷水丰富这一基本条件,云不具可播性。

在整个平飞过程中,参照以往研究结果,结合过冷水含量及冰晶浓度等探测结果,对不同时段云中可播性进行了标注(图10)。结果表明播撒作业过

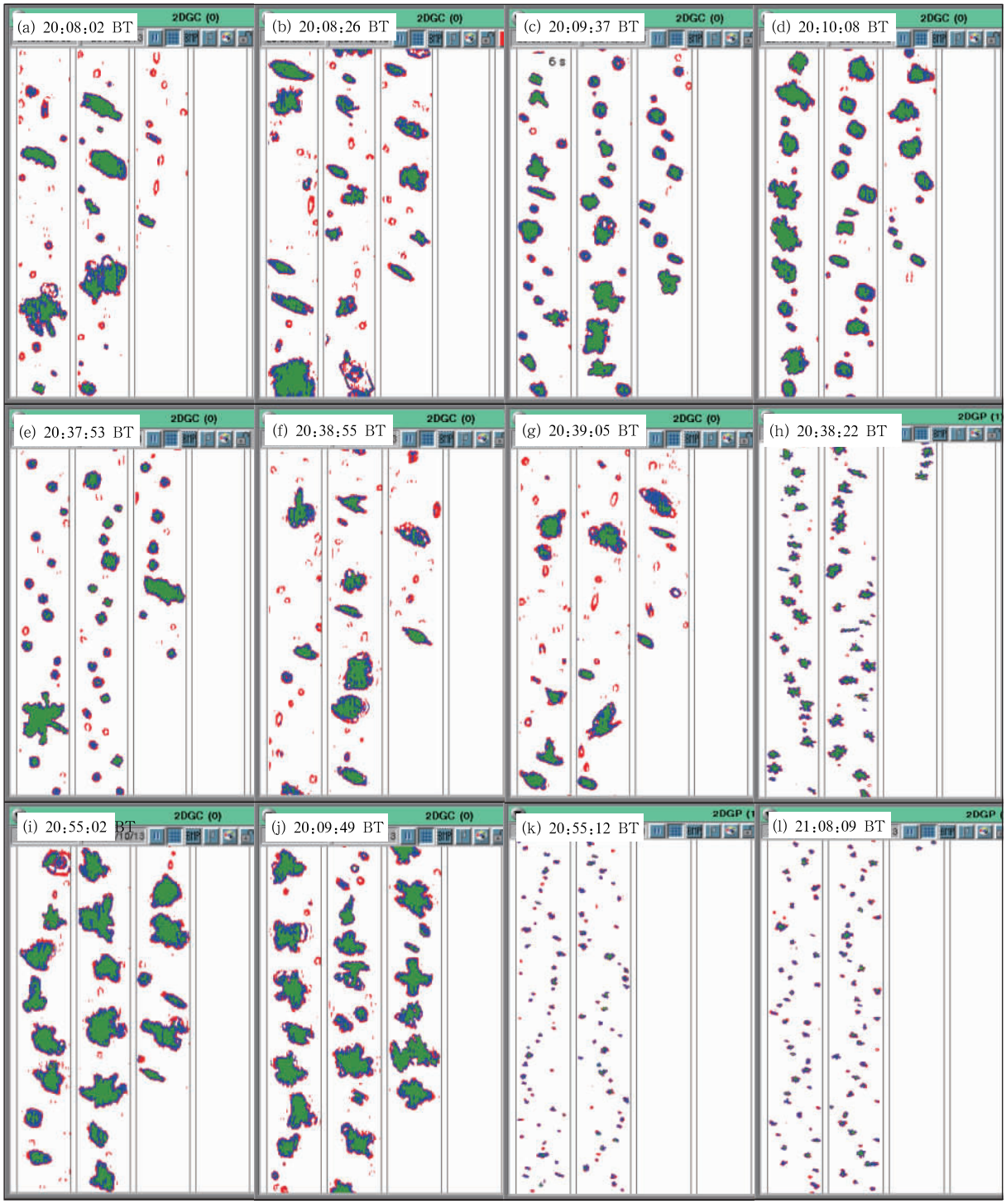


图 8 探测和催化影响时段典型时刻的二维粒子图像
(其中 h、k、l 为 2DP 图像)
Fig. 8 The 2DC images at typical moments during the probe and the seeding time
(h, k, l. 2DP images)

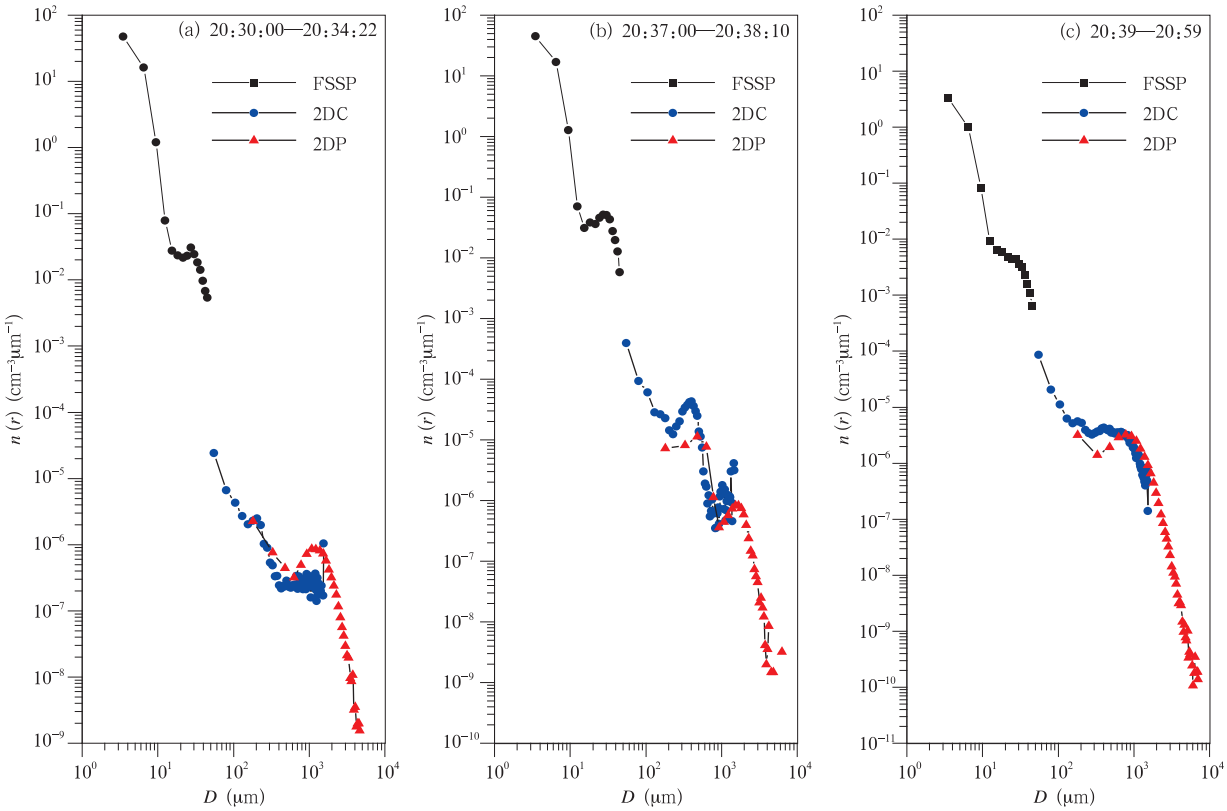


图 9 不同时段云粒子谱分布

Fig. 9 Distributions of cloud droplet spectrum in different times

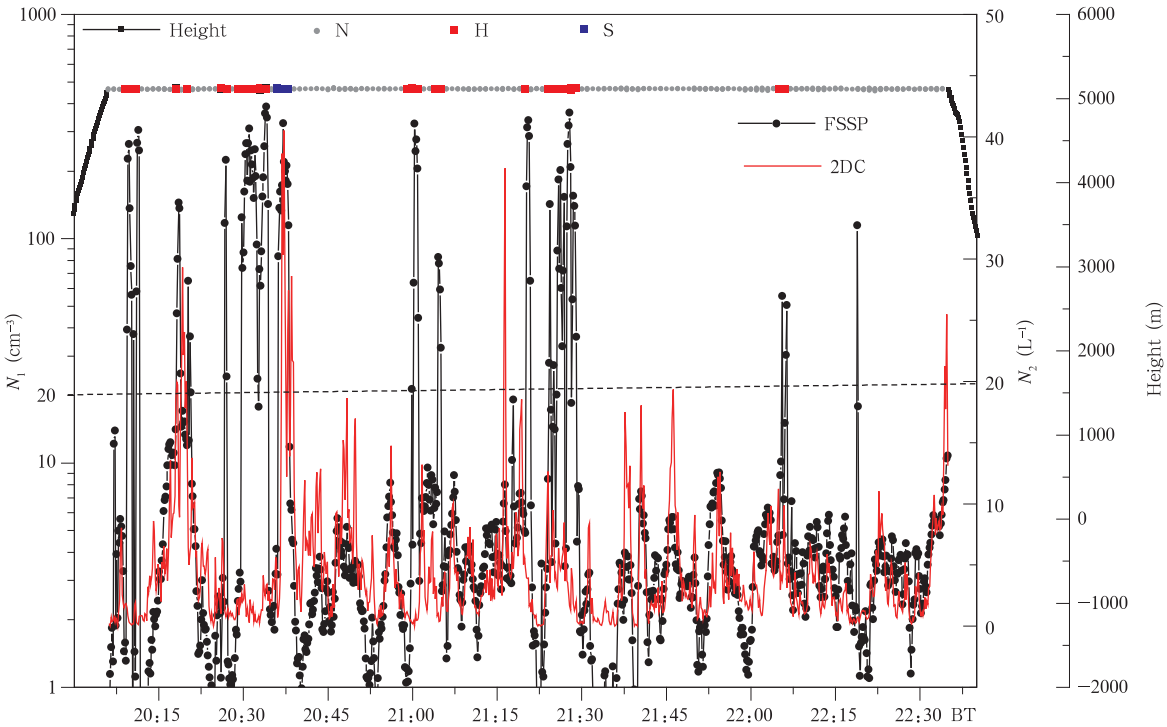


图 10 平飞过程中云粒子随时间分布

(H:强可播区,S:可播区,N:不可播区)

Fig. 10 Evolution of number concentration of cloud droplets during the level flight

(H for highly seedable area, S for seedable area, N for hardly seedable area)

程中(20 时 06 分—21 时 15 分),FSSP 探测的云粒子浓度 N_1 大于 20 cm^{-3},甚至高于 10^2 cm^{-3}量级的云区占很大比例,而 2DC 探测的粒子浓度 N_2 较低,大部分处于可播区,适合进行人工增雨作业。后期播撒作业停止后(21 时 30 分—22 时 30 分)云粒子浓度 N_1 较低,不可播区占主导。

4.5 作业前、后积层混合云微物理特征响应

分析作业前、后云中粒子浓度及粒子谱变化是检验作业效果的重要方法之一(陈万奎等,1992;王以琳等,2003;王黎俊等,2013b)。表 2 给出了作业前、后不同时段探测的云中粒子浓度及平均直径的对比。总体上呈现了作业后云粒子浓度 N_1 降低,冰晶粒子浓度 N_2 升高,粒径增大,降水粒子浓度 N_3 也略有升高的趋势。具体表现:云粒子浓度 N_1 在作业前 a1—a2 时段平均值为 31 cm^{-3},远高于作业后的平均浓度(17.6 cm^{-3});但平均直径 D_1 却相差不大,均为 4.0—4.5 μm。其中催化影响时段 c1—c2 探测到的云粒子浓度 N_1 稍高于探测 a1—a2 时段,可能原因是催化剂播撒 30 min 后,冰晶粒子通过贝吉龙过程反应不充分,云中仍存在较多的过冷水,造成云粒子浓度 N_1 维持在较高水平。作业后 2DC 探测的粒子浓度 N_2 由之前的 0.86 L^{-1}升高至 2.39 L^{-1},平均直径也增大为 687 μm。说明作业后 N_2 通过贝吉龙过程消耗过冷水长大,形成大量冰晶,浓度升高,同时导致 N_1 蒸发浓度降低;冰晶等粒子逐渐长大形成降水,2DP 观测的降水粒子浓度 N_3 也相应有所升高,粒径变化不大。

从作业前、后多个时段对应的粒子谱看,FSSP 探头探测的云粒子谱浓度 dN_1/dD_1(图 11a)在作业前、后谱的分布变化不大,呈单调递减趋势;作业后的浓度值在整个粒径范围内均低于作业前(除 c1—c2 时段外),最大浓度由 7 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$降至 0.8 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$,a1—a2 时段明显高于 d1—d2、f1—f2 时段的数浓度,a3—a4 时段高于 b1—b2 时段。2DC 探测的粒子谱型总体为递减分布,大多存在双峰,且作业后的第2峰值直径有增大的趋势,比如

表 2 作业前、后不同时段探测的云粒子浓度及粒径对比

Table 2 Comparison of concentration and diameter of cloud droplet during the probe and the seeding period

时段		FSSP		2DC		2DP	
		N_1(cm^{-3})	D_1(μm)	N_2(L^{-1})	D_2(μm)	N_3(L^{-1})	D_3(μm)
探测 a1—a2	20 时 06 分—20 时 10 分	31.0	4.24	0.86	466	1.82	855
催化 c1—c2	20 时 37 分—20 时 41 分	46.5	4.26	8.75	377	3.63	843
催化 d1—d2	20 时 53 分—20 时 55 分	2.79	4.09	1.67	587	2.61	986
催化 f1—f2	21 时 08 分—21 时 15 分	3.49	4.26	2.39	687	3.27	1110
催化时段平均值		17.6	4.20	4.27	550	3.17	980
探测 a3—a4	20 时 11 分—20 时 13 分	15.0	4.32	1.31	500	2.47	615
催化 b1—b2	20 时 23 分—20 时 24 分	1.2	4.23	2.15	463	3.19	620

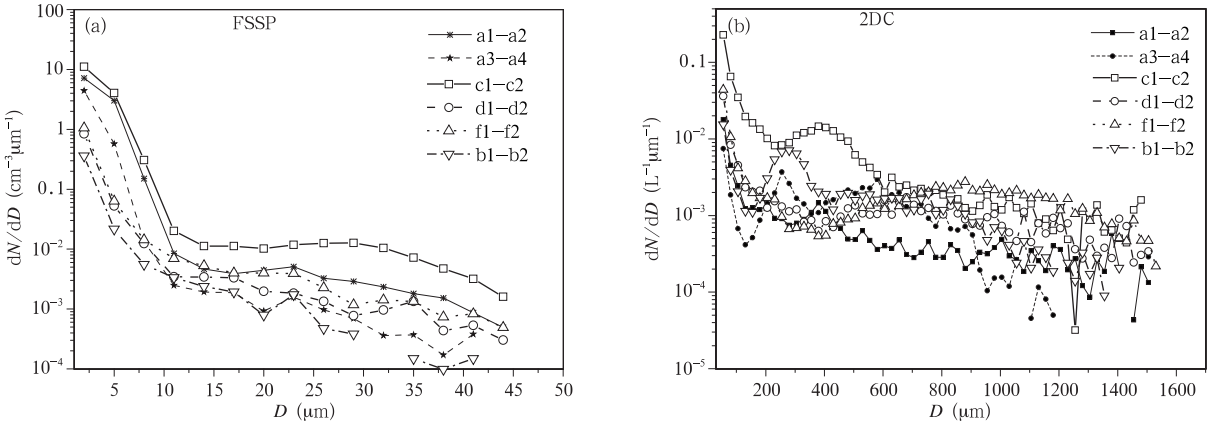
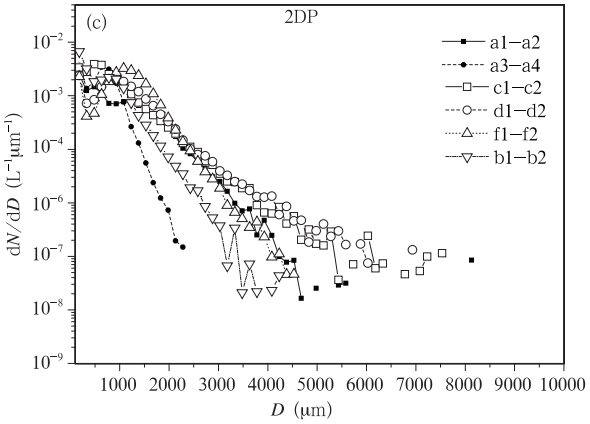


图 11 作业前、后不同时段的平均云粒子谱分布

(a. FSSP, b. 2DC, c. 2DP)

Fig. 11 Distribution of cloud droplet spectrums during the probe and the seeding periods

(a. FSSP, b. 2DC, c. 2DP)



续图 11

Fig. 11 Continued

a3—a4 时段位于 255 μm,b1—b2 时段增至 280 μm;作业后的浓度值普遍高于作业前。2DP 探测的降水粒子谱型为双峰分布,作业后粒子浓度有所升高,主要体现在小粒径段,而第 2 个峰值直径由 481.5 μm 增至 631.5—1081.5 μm。大粒径段的数浓度升高,谱宽增宽明显。

对作业前、后几个时段的云微物理特征分析表明,作业影响时段探测的云中观测到 N_1 浓度降低,N_2 浓度升高,平均直径增大,且降水粒子浓度 N_3 升高,谱宽变宽的现象。

4.6 作业影响区与对比区的雨量分析

为了分析催化作业效果,不考虑催化剂的扩散和因核化可能引起的剂量衰减等复杂因素的影响,仅以环境风场的水平输送分析其影响区(王黎俊等,2013b)。从探空图看,作业区域 5100 m 高度风速为 22 m/s,风向 252°,催化作业时间 20 时 06 分—21 时 15 分,确定作业影响区。如图 12a 所示,中间黑色框区为作业影响区,根据雨带分布特征(图 2),在上、下风向各选出同样大小的区域作为对比区。随着系统移动,作业区和对比区也随之移动。为了定量分析作业效果,作业区与对比区的平均雨量具体计算方法参照文献(蔡兆鑫等,2013;秦彦硕等,2015)。为了减小云带分布不均匀造成不同区域降水的差异,更明显看出作业区和对比区雨量在作业前后的不同,将对比区进行平均,并绘出二者比值(图 12b 中黑线)。其中 20 时为作业前降水情况,21 时为作业期间,之后为作业后降水演变情况(图 12b)。由图可看出,作业区和对比区的降水量在催化作业前相当,均为 0.3 mm;催化作业过程中作业区雨量略有降低,但催化后 1 h 雨量均有显著增大,从催化后 2 h 开始,作业影响区因受到催化的影响,雨量减少的速率变慢,二者比值处于 1.0 以上,这一特征在催化作业后 4 h 最为显著。在作业后 5 h 效果降低。可见作业后对雨量的影响持续了 4 h 左右,在作业后 3—4 h 效果最显著。

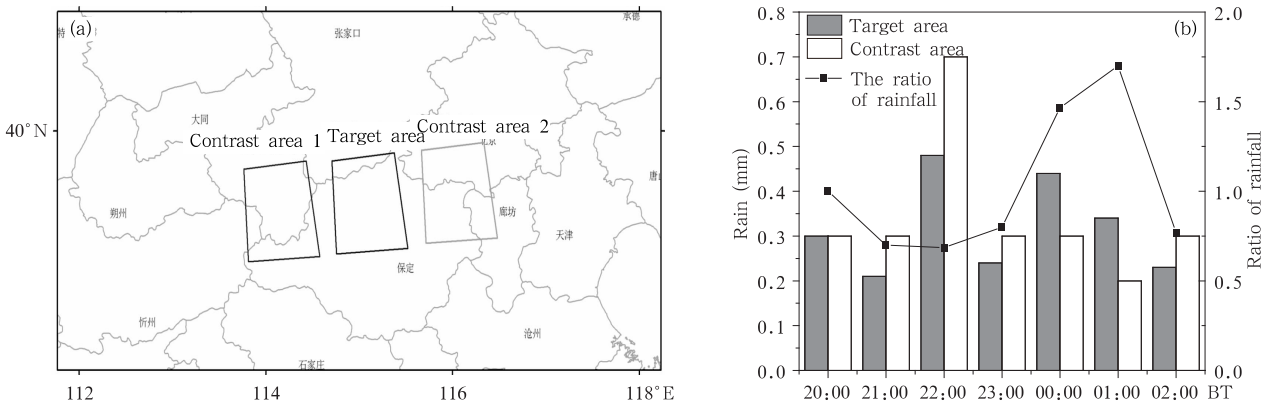


图 12 作业影响区和对比区 20 时—次日 02 时逐时平均雨量变化

(a. 影响区和对比区位置示意,b. 影响区和对比区平均雨量对比)

Fig. 12 Time series of hourly precipitation during 20:00 - 02:00 BT in the target and contrast areas

(a. schematic diagram of location between target and all contrast areas, b. average rainfall comparison between target and all contrast areas)

5 结 论

2013 年 10 月 13—14 日在西风槽和地面冷锋的共同作用下,华北地区出现了一次自西向东大范

围降水过程。13 日 20 时前后冷锋过境时,河北省夏延飞机在张家口涞源地区进行了一次增雨探测,从机载设备探测的云微物理观测资料分析得出如下结论:

(1) 此次降水性积层混合云系的垂直结构由冷、暖两层云组成,云层发展厚实,中间有薄的干层,符合"播种-供应"云微物理结构。4000—5100 m 冷云区云粒子浓度 N_1 平均为 62 cm^{-3},最大值 253 cm^{-3},液态水含量最大值 0.05 g/m^3;2DC 和 2DP 探测的 N_2 和 N_3 平均浓度分别为 1.9 和 2.2 L^{-1}。暖云(2400—3550 m)内 FSSP 探测到云粒子数浓度约集中在 300 cm^{-3},液态水含量较高,约处于 0.1 g/m^3。

(2) 探测区域 FSSP 观测的云粒子浓度 N_1 在整个云区内的水平分布差异较大,最大浓度为 430 cm^{-3},而平均直径则约集中在 4 μm。整个云区内冰晶和降水粒子浓度均主要集中在 0.1—10 L^{-1},2DC 探测的粒子数浓度 N_2 与直径 D_2 呈现明显的反相关。作业前 a1—a2 时段内绝大部分区域云粒子 N_1 均处于高值区,液态水含量也达到 0.01 g/m^3;作业后 c1—c2、d1—d2 和 f1—f2 时段内的云粒子 N_1 则处于 1—10 cm^{-3},云中液态水含量也被消耗而明显降低,2DC、2DP 探测的粒子浓度较作业前 a1—a2 时段较高。

(3) 通过对作业前、后不同时段探测的云中粒子浓度及平均直径的对比发现,云粒子在作业前时段内的平均浓度 N_1 为 31 cm^{-3},远高于作业后平均浓度(17.6 cm^{-3});但平均直径 D_1 变化不大。作业后冰晶粒子通过贝吉龙过程消耗过冷水长大,浓度 N_2 由之前的 0.86 L^{-1} 增至 4.27 L^{-1},平均直径也增大至 550 μm。冰晶粒子逐渐长大形成降水,降水粒子浓度 N_3 也相应有所升高,谱明显变宽。催化作业后对影响区地面雨量在 3—4 h 效果最显著。

参考文献

蔡兆鑫,周毓荃,蔡淼. 2013. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析. 高原气象,32(5):1460-1469. Cai Z X, Zhou Y Q, Cai M. 2013. Analysis on comprehensive observation of artificial precipitation enhancement operation for a Convective-Stratiform mixed cloud. Plateau Meteror, 32(5): 1460-1469 (in Chinese)

陈万奎,严采蘩,吴心遂等. 1992. 碘化银消除过冷低云试验结果. 应用气象学报,3(S):59-66. Chen W K, Yan C F, Wu X S, et al. 1992. An experiment on supercooled lower cloud dissipation by seeding AgI. Quart J Appl Meteor, 3(S): 59-66 (in Chinese)

邓育鹏,董晓波,吕锋等. 2013. 河北省降水性层状云宏微观物理特征. 气象与环境学报,29(3):29-34. Deng Y P, Dong X B, Lv F, et al. 2013. Macro and microphysical characters of precipitable stratiform cloud over Hebei province. J Meteor Environ, 29(3): 29-34 (in Chinese)

洪延超,周非非. 2005. "催化-供给"云降水形成机理的数值模拟研究. 大气科学,29(6):885-896. Hong Y C, Zhou F F. 2005. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of "Seeding-Feeding" cloud system. Chinese J Atmos Sci, 29(6): 885-896 (in Chinese)

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(S):10-13. Hu Z J. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds. Quart J Appl Meteor, 12(S): 10-13 (in Chinese)

李宝东,孙玉稳,孙霞等. 2014. 河北春季一次飞机人工增雪的综合分析. 干旱气象,32(5):819-829. Li B D, Sun Y W, Sun X, et al. 2014. Comprehensive analysis of aircraft artificial precipitation on stratiform clouds in spring over Hebei Province. J Arid Meteor, 32(5): 819-829 (in Chinese)

李铁林,雷恒池,刘艳华等. 2010. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析. 气象,36(9):74-80. Li T L, Lei H C, Liu Y H, et al. 2010. Microphysical characteristics of a precipitation process in Henan province. Meteor Mon, 36(9): 74-80 (in Chinese)

刘卫国,苏正军,王广河等. 2003. 新一代机载 PMS 粒子测量系统及应用. 应用气象学报,14(S):11-18. Liu W G, Su Z J, Wang G H, et al. 2003. Development and application of new-generation airborne particle measuring system. J Appl Meteor Sci, 14(S): 11-18 (in Chinese)

秦彦硕,刘世玺,范根昌等. 2015. 华北地区春季一次层状云的微物理特征及可播性分析. 干旱气象,33(3):481-489. Qin Y S, Liu S X, Fan G C, et al. 2015. Analysis on microphysical characteristics and seedability of a stratiform cloud in spring over North China. J Arid Meteror, 33(3): 481-489 (in Chinese)

孙鸿娉,李培仁,闫世明等. 2011. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究. 气象,37(10):1252-1261. Sun H P, Li P R, Yan S M, et al. 2011. A study of microphysical characteristics and seedability of cold stratiform clouds in North China. Meteor Mon, 37(10): 1252-1261 (in Chinese)

陶树旺,刘卫国,李念童等. 2001. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究. 应用气象学报,12(S):14-22. Tao S W, Liu W G, Li N T, et al. 2001. A study of real-time identification of seedability of cold stratiform clouds. Quart J Appl Meteor, 12(S): 14-22 (in Chinese)

陶玥,洪延超. 2007. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数值研究. 气象学报,65(2):221-230. Tao Y, Hong Y C.

2007. Numerical simulation of influence of drop size distribution shape on cloud and precipitation. Acta Meteor Sinica, 65(2): 221-230 (in Chinese)

汪玲，刘黎平. 2015. 人工增雨催化区跟踪方法与效果评估指标研究. 气象，41(1)：84-91. Wang L, Liu L P. 2015. Algorithm and assessment of tracking seeding coverage in artificial precipitation enhancement. Meteor Mon, 41(1): 84-91 (in Chinese)

王黎俊，银燕，李仑格等. 2013a. 三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测分析. 大气科学，37(5)：1038-1058. Wang L J, Yin Y, Li L G, et al. 2013a. Analyses on typical autumn multilayer stratiform clouds over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne obsverations. Chinese J Atmos Sci, 37(5): 1038-1058 (in Chinese)

王黎俊，银燕，姚展予等. 2013b. 三江源地区秋季一次层积云飞机人工增雨催化试验的微物理响应. 气象学报，71(5)：925-939. Wang L J, Yin Y, Yao Z Y, et al. 2013b. Microphysical responses as seen in a stratocumulus aircraft seeding experiment in autumn over the Sanjiangyuan National Nature Reserve. Acta Meteor Sinica, 71(5): 925-939 (in Chinese)

王以琳，雷恒池. 2003. 冷云飞机人工引晶检验. 大气科学，27(5)：929-938. Wang Y L, Lei H C. 2003. Test of cold cloud seeding. Chinese J Atmos Sci, 27(5): 929-938 (in Chinese)

余兴，王晓玲，戴进. 2002. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究. 气象学报，60(2)：205-214. Yu X, Wang X L, Dai J. 2002. Research on simulation of effective range for cloud seeding by aircraft within super-cooled stratus. Acta Meteor Sinica, 60(2): 205-214 (in Chinese)

赵增亮，毛节泰，魏强等. 2010. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析. 气象，36(5)：71-77. Zhao Z L, Mao J T, Wei Q, et al. 2010. A study of vertical structure of Spring stratiform clouds in Northwest China. Meteor Mon, 36(5): 71-77 (in Chinese)

赵震，雷恒池. 2008. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究. 大气科学，32(2)：323-334. Zhao Z, Lei H C. 2008. A numerical simulation of cloud physical structure and microphysical processes associated with stratiform precipitation in Northwest China. Chinese J Atmos Sci, 32(2): 323-334 (in Chinese)

周黎明，牛生杰，王俊. 2014. 不同天气系统层状云微物理特征个例分析. 气象，40(3)：327-335. Zhou L M, Niu S J, Wang J. 2014. Case analysis on microphysical characteristics of stratiform cloud under synoptic systems. Meteor Mon, 40(3): 327-335 (in Chinese)

朱士超，郭学良. 2014. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究. 气象学报，72(2)：366-389. Zhu S C, Guo X L. 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements. Acta Meteor Sinica, 72(2): 366-389 (in Chinese)

Baumgardner D, Korolev A. 1997. Airspeed corrections for optical array probe sample volumes. J Atmos Oceanic Technol, 14(5): 1224-1229

Cober S G, Isaac G A, Korolev A V, et al. 2001a. Assessing cloud-phase conditions. J Appl Meteor, 40(11): 1967-1983

Cober S G, Isaac G A, Strapp J W, et al. 2001b. Characterizations of aircraft icing environments that include supercooled large drops. J Appl Meteor, 40(11): 1984-2002

Coelho A A, Brenguier J L, Perrin T. 2005. Droplet spectra measurements with the FSSP-100. Part II: Coincidence effects. J Atmos Oceanic Technol, 22(11): 1756-1761

Geerts B, Miao Q, Yang Y, et al. 2010. An airborne profiling radar study of the impact of glaciogenic cloud seeding on snowfall from winter orographic clouds. J Atmos Sci, 67(10): 3286-3302

Hobbs P V. 1991. Twenty years of airborne research at the University of Washington. Bull Am Meteor Soc, 72(11): 1707-1716

Korolev A V, Isaac G A, Cober S G, et al. 2003. Microphysical characterization of mixed-phase clouds. Quart J Roy Meteor Soc, 129(587): 39-65

McFarquhar G M, Cober S G. 2004. Single-scattering properties of mixed-phase Arctic clouds at solar wavelengths: Impacts on radiative transfer. J Climate, 17(19): 3799-3813

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(D24): D24201

Solak M E, Yorty D P, Griffith D A. 2003. Estimations of downwind cloud seeding effects in Utah. J Wea Mod, 35(1): 1-7

Strapp J W, Albers F, Reuter A, et al. 2001. Laboratory measurements of the response of a PMS OAP-2DC. J Atmos Oceanic Technol, 18(7): 1150-1170

Yum S S, Hudson J G. 2002. Maritime/continental microphysical contrasts in stratus. Tellus B, 54(1): 61-73