

张佃国,樊明月,龚佃利,等. 一次降水性积层混合云系的微物理特征分析[J]. 大气科学学报,2010,33(4):496-503.

Zhang Dian-guo, Fan Ming-yue, Gong Dian-li, et al. An analysis of microphysical characteristics on precipitation cumulus-stratus mixed clouds system [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(4):496-503.

## 一次降水性积层混合云系的微物理特征分析

张佃国,樊明月,龚佃利,张洪生

(山东省人工影响天气办公室,山东 济南 250031)

**摘要:**利用山东省2007年10月27日1架次机载粒子测量系统(Particles Measuring System, PMS)积层混合云探测资料,分析了云中粒子浓度和尺度、液态含水量,以及小云滴和大云滴谱的垂直分布特征,比较了催化前后云微物理特征的变化。结果表明,催化前,云层中小云滴谱型为单峰,谱宽随高度增加先变窄后变宽,大云滴谱型在云低层为单峰,中高层为双峰谱,谱宽随高度增加先变宽后变窄,并且没有探测到降水粒子。催化后,小云滴尺度在低层减小、高层增加,整层液态水含量减小;大云滴浓度增加,尺度增大,出现降水粒子,固态粒子类型增多。在3 700~4 000 m高度层内小于10  $\mu\text{m}$  粒子明显增加,说明凝结过程比较明显,并且10~27.5  $\mu\text{m}$  粒子开始出现,启动了云滴的碰并机制。小云滴谱变化较小,基本为单峰谱,但在较大云滴处谱型略有起伏,在3 000 m和3 300 m高度的谱宽增宽。大云滴粒子谱有较大的变化,低层变成双峰谱,谱宽最宽可达650  $\mu\text{m}$ ,中高层为双峰或多峰,峰值从小值向较大值移动。2D-P探头在催化云高层探测到降水粒子,谱型呈单调下降形态,谱宽最大为600  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**积层混合云;催化作业;微物理结构;粒子测量系统

中图分类号:P426.5 文献标识码:A 文章编号:1674-7097(2010)04-0496-08

## An Analysis of Microphysical Characteristics on Precipitation Cumulus-Stratus Mixed Clouds System

ZHANG Dian-guo, FAN Ming-yue, GONG Dian-li, ZHANG Hong-sheng

(Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China)

**Abstract:** Based on one aircraft flights cumulus-stratus mixed clouds system data sampled with probes of Particles Measuring System (PMS) on 27 October 2008 in Shandong Province, the vertical distributions of concentration and diameter of cloud particles, and liquid water content (LWC), and spectrum of small and large cloud droplets are analyzed. The changes of cloud microphysical characteristics before and after seeding are compared. Results show that, before seeding, small cloud droplets spectrum appears unimodal vertical distribution with spectrum width broadened after first-narrow, and big cloud droplets spectrum unimodal (bimodal) vertical distribution in the lower layer (in the middle and high layers) with spectrum width narrowed after first-wide, and precipitation droplet is not observed by 2D-P. After seeding, cloud droplets diameter reduces (increases) in low layer (in high layer), and liquid water content in the whole layer decreases. The concentration and diameter of big cloud droplets increase, precipitation particles appear, and solid particles increase. The particles of smaller than 10  $\mu\text{m}$  increase significantly in 3 700—4 000 m height layers, indicating that condensation process is obvious,

收稿日期:2009-09-07; 改回日期:2010-03-12

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAC12B02); 山东省气象局重点课题(2009sdqxz16)

作者简介:张佃国(1977—),男,山东东阿人,硕士,工程师,研究方向为云降水物理, zdg131415@sohu.com.

and 10—27.5  $\mu\text{m}$  particles begin to appear because the collision mechanism of cloud particles has started. The small cloud droplets spectrum is unimodal distribution, but the large cloud droplets spectrum has fluctuating with spectrum width broadened in 3 000 m and 3 300 m height layers. The large cloud droplets spectrum shows bimodal distribution with maximum spectrum width of 650  $\mu\text{m}$  in the low layer, and bimodal and multimodal distribution in the middle and high layers with peak moving from small to large values. The 2D-P probe can observe the precipitation particles in high layer of seeding cloud, and the spectrum type decreases monotonically with maximum spectrum width of 600  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** cumulus-stratus mixed clouds; seeding operation; microphysical structure; particles measuring system

## 0 引言

对积层混合云中微物理结构的研究,一直是人工影响天气工作者所关注的重要内容。20世纪80年代初期以来,我国开始使用PMS(Particle Measuring System)系统,对云微物理结构进行飞行探测,王谦等<sup>[1]</sup>对新疆积层混合云作了探测研究。樊曙先<sup>[2]</sup>利用一次降水云飞行探测资料,分析了云中液态水含量的变化。杨文霞等<sup>[3]</sup>利用河北省积层混合云飞机探测资料,研究了云中的播撒潜力区以及云的可播性判别。李照荣等<sup>[4]</sup>研究甘肃省秋季冰雪晶粒子特征分布后发现,在一定的云水条件下,积层混合云有较大的增雨催化潜力。陈万奎和马培民<sup>[5]</sup>、陈万奎和游来光<sup>[6]</sup>、廖飞等<sup>[7]</sup>利用PMS对四川、新疆积层混合云进行了探测研究。张连云和冯桂利<sup>[8]</sup>、苏正军等<sup>[9]</sup>分别讨论了山东省和青海省积层混合云及降水的微物理特征。王杨峰等<sup>[10]</sup>研究了延安暖层云水凝物粒子的谱分布,发现暖层水凝物粒子的谱分布可以用一种形式的分布密度函数来表示。黄梦宇和赵春生<sup>[11]</sup>2005年对华北积层混合云微物理特性作了研究,认为云下气溶胶浓度与云滴数浓度两者之间存在正相关关系。

国外早在20世纪70年代开始利用PMS作观测试验,Hobbs和Radke<sup>[12]</sup>对美国温带气旋云系和地形云进行了探测试验。Houze等<sup>[13]</sup>给出了温带气旋计划中锋面云降水粒子尺度谱分布。Lo和Passarelli<sup>[14]</sup>研究了美国冬季风暴降水粒子尺度谱分布。Gorden等<sup>[15]</sup>分析了加利福尼亚雨带降水粒子尺度谱分布。Grabowski和Moncrieff<sup>[16]</sup>对前苏联冬季积层混合云探测和人工影响试验等进行了研究。Korolev<sup>[17]</sup>从PMS的FSSP-100探头获取的资料分析得出,在云中粒子谱普遍呈双峰分布。这些试验利用PMS观测云中冰晶、雪粒子浓度和尺度分布,并通过计算得到这些粒子的含水量,对了解云结构特征、进行云粒子谱分布的参数化研究起到了较

好作用。

可以看出,国内外对降水云系结构和微物理结构的研究比较成熟,但对催化作业前后微物理结构的特征变化的研究还比较少,本文拟利用2007年10月27日一次降水过程的飞机探测资料,分析一次降水性积层混合云微物理结构,以揭示云微物理特征的垂直变化以及催化作业后出现的一些特征。

## 1 宏观分析

### 1.1 天气形势

在东北冷涡和西南涡的共同影响下,山东省西南500 hPa上空出现一高空槽,西面有一小气旋型涡旋。700 hPa和850 hPa高度上有一弱的切变线配合,在其共同影响下,2007年10月27日山东西部地区出现了一次明显的降水过程。图1给出了飞机飞行时段内济南雷达回波演变情况,红色方框为催化作业区,白色箭头为风向。从雷达回波(图1a、b)上可以看出,催化作业时回波强度分布不均匀,作业区内回波强度最强可达25 dBZ,催化45 min后,发现作业区内回波强度有所增强,最大回波可达30 dBZ,1 h后雷达回波(图1c)范围加大,山东西面的回波连成一片,回波强度仍然是维持在30 dBZ左右,作业区域内回波比较均匀,面积逐渐扩大,云体由NW向SE移动,处于发展阶段。

### 1.2 飞行轨迹

图2给出了2007年10月27日飞机飞行探测区域和轨迹,飞机14:05(北京时,下同)从济南遥墙机场起飞,本场天气阴,地面没有降水,地面温度为19.3  $^{\circ}\text{C}$ 。飞机起飞后先爬升到安全高度(2 900 m)进行水平飞行,于14:26到达高唐南飞行作业探测区,高度为4 100 m,温度为-7.3  $^{\circ}\text{C}$ 。在作业区先进行线状(图2b两红点之间4 100 m高度)AgI播撒作业,然后进行每300 m为一个高度层的水平探测飞行,以3 800  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右速率进行水平飞行,飞行约6 min找“转弯点”作盘旋垂直下降,下降速

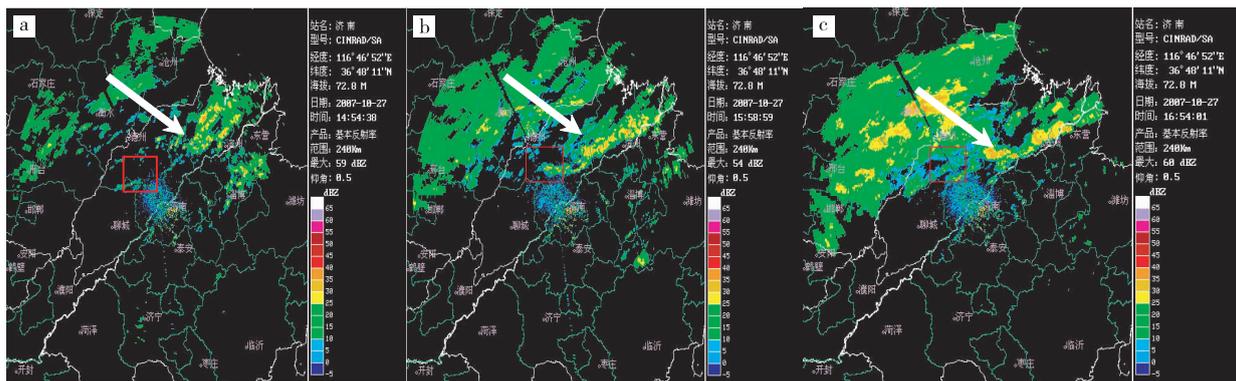


图 1 2007 年 10 月 27 日 14:54(a)、15:54(b) 和 16:54(c) 作业时的济南雷达回波图

Fig. 1 Jinan radar echo maps in seeding operation at (a) 14:54 BST, (b) 15:58 BST, and (c) 16:54 BST 27 October 2007

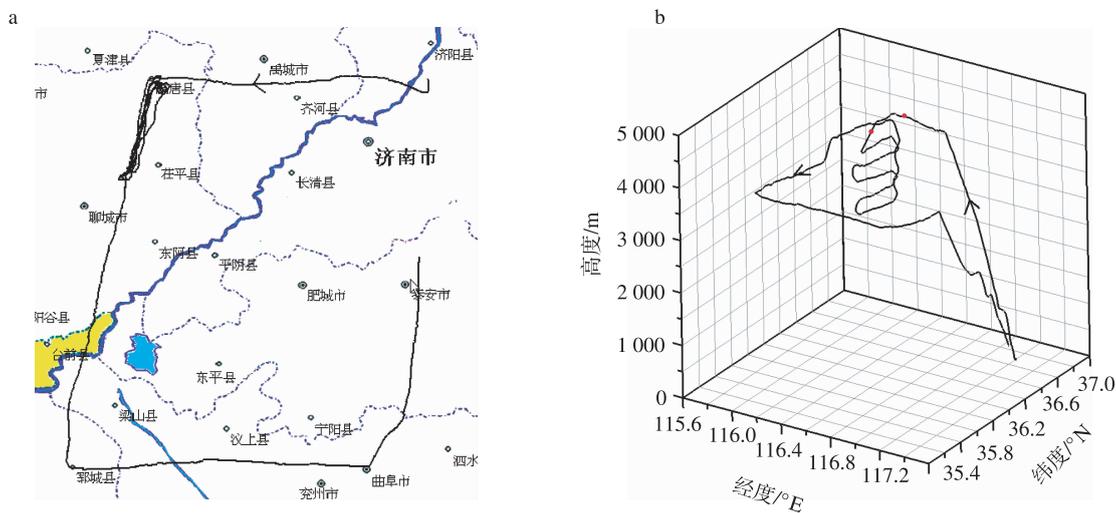


图 2 2007 年 10 月 27 日飞行区域 (a) 和空间飞行轨迹 (b)

Fig. 2 The maps of (a) flight area and (b) spatial flight line on October 27, 2007

度为  $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  左右, 转弯半径约 2 km, 盘旋下降 300 m 到第 2 个高度层 (约需要 2 min), 水平飞行约 6 min, 过“转弯点”继续做盘旋下降到第 3 个高度层, 然后重复以上的过程到 2 400 m, 由于空军管制的限制, 未能飞行至云底, 下降过程水平飞行 5 层, 用时约 45 min。在进行完最后一层水平飞行后, 以转弯半径 2 km, 螺旋上升的方式进行垂直探测, 飞至 4 100 m, 用时约 15 min, 水平飞行, 然后至机场降落, 落地时间为 17:12, 整个过程共计 3 h 14 min。

## 2 结果分析

### 2.1 云微观结构

图 3 给出了小云滴 (FSSP-100)、大云滴 (2D-C) 浓度和对应尺度以及含水量的垂直分布。由于探测时间不长, 数据采样有限, 故采用原始数据。从图 3 可看到, 在 4 100 m 和 3 700 m 中间 FSSP-100、2D-C 及 King 测量仪都没有数据, 主要是因为在下

降过程中, 计算机死机重新启动的原因。根据 FSSP-100 探测资料可以看出,  $0^\circ\text{C}$  层 (图 4d 中温度廓线) 高度约为 2 900 m, 4 100 m 基本上接近云顶高度。小云滴浓度垂直分布不均匀 (图 3a), 垂直方向上粒子浓度呈现多峰现象, 峰值分别在 2 700、3 100、3 400、4 100 m 高度附近, 峰值最大值可达  $8.66 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ , 对应的粒子尺度 (图 3b) 和液态含水量 (图 3c) 也出现相应的多峰变化, 峰值直径最大可达  $30 \mu\text{m}$ , 含水量峰值最大为  $0.12 \text{ g/m}^3$  (2 700 m)。从 2D-C 探测资料 (图 3d, e) 看, 图形呈线性变化, 主要是采样点少的原因, 在 2 400 ~ 2 800 m 高度层内大云滴浓度较小只有  $0.5 \text{ L}^{-1}$ , 直径基本上小于  $100 \mu\text{m}$ , 在 2 800 ~ 4 000 m 高度层内图形呈线性变化, 主要是中间没有采样点, 也就是说没有出现较大云滴, 在 4 100 m 出现大云滴粒子浓度峰值, 可达  $2.5 \text{ L}^{-1}$ , 对应的粒子尺度增大, 最大可达  $140 \mu\text{m}$ , 说明云层垂直发展不均匀, 高层发展较旺盛, 存在较

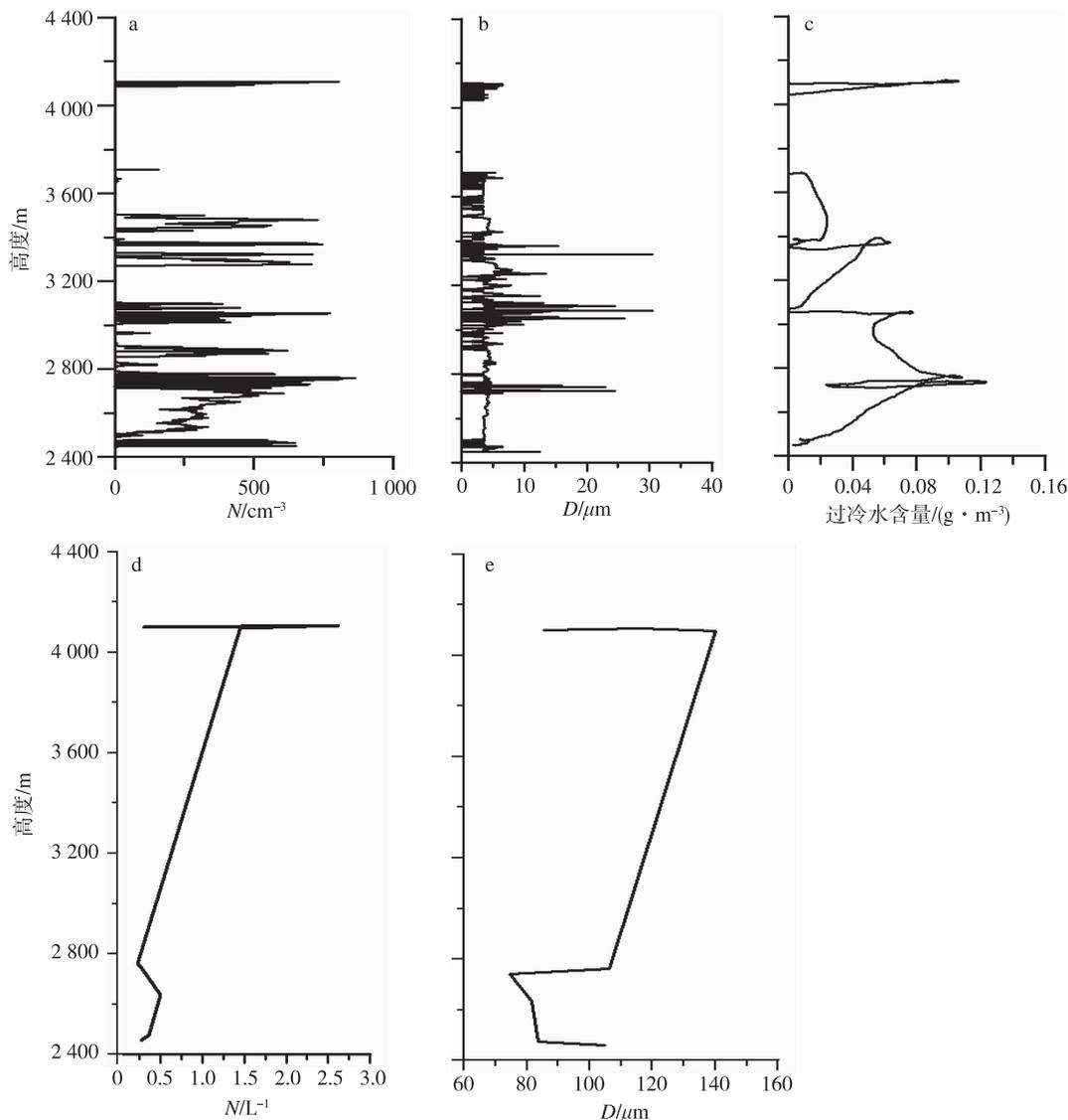


图3 小云滴(FSSP-100)、大云滴(2D-C)浓度和对应尺度及含水量随高度的变化 a. 小云滴浓度;b. 小云滴尺度;c. 过冷水含量;d. 大云滴浓度;e. 大云滴尺度

Fig. 3 Vertical distributions of concentration and diameter of small cloud droplets (from FSSP-100), large cloud droplets (2D-C), and supercooled water content a. concentration of small cloud droplets; b. diameter of small cloud droplets; c. supercooled water content; d. concentration of large cloud droplets; e. diameter of large droplets

多的大粒子,4 000 m 以下云层发展较弱,主要以小粒子为主,大粒子较少,没有出现降水粒子。

图4给出了催化作业45 min后小云滴(FSSP-100)、大云滴(2D-C)、降水粒子(2D-P)浓度及对应尺度和含水量的垂直分布。从FSSP-100探测资料(图4a、b)看,与催化前相比,在3 700~4 000 m高度层内小于10  $\mu\text{m}$  粒子明显增加,说明凝结过程比较明显,且10~27.5  $\mu\text{m}$  粒子开始出现,说明启动了云滴的碰并机制,同时出现了较大液态水含量(图4c),云层没有干层,从2 400~4 100 m高度层内可以看出,粒子尺度有所变化,而低层粒子尺度有

所减小,高层粒子尺度增加,并在4 100 m出现了峰值,最大可达45  $\mu\text{m}$ 左右,液态水含量减少,最大值由原来的0.13  $\text{g}/\text{m}^3$ 变化为0.1  $\text{g}/\text{m}^3$ ,估计是播撒AgI的结果,液体水暂时被AgI粒子争食掉,此问题还需进一步分析证实。从2D-C资料(图4e、f)发现,与播撒前相比,大云滴浓度最大值由原来的3.0  $\text{L}^{-1}$ 增大为10  $\text{L}^{-1}$ ,粒子尺度最大值由原来的160  $\mu\text{m}$ 增加到300  $\mu\text{m}$ 。在4 000 m至4 100 m的高度层内2D-P开始探测到降水粒子(图4g、h),浓度最大可达3.5  $\text{L}^{-1}$ ,尺度最大约为580  $\mu\text{m}$ 。

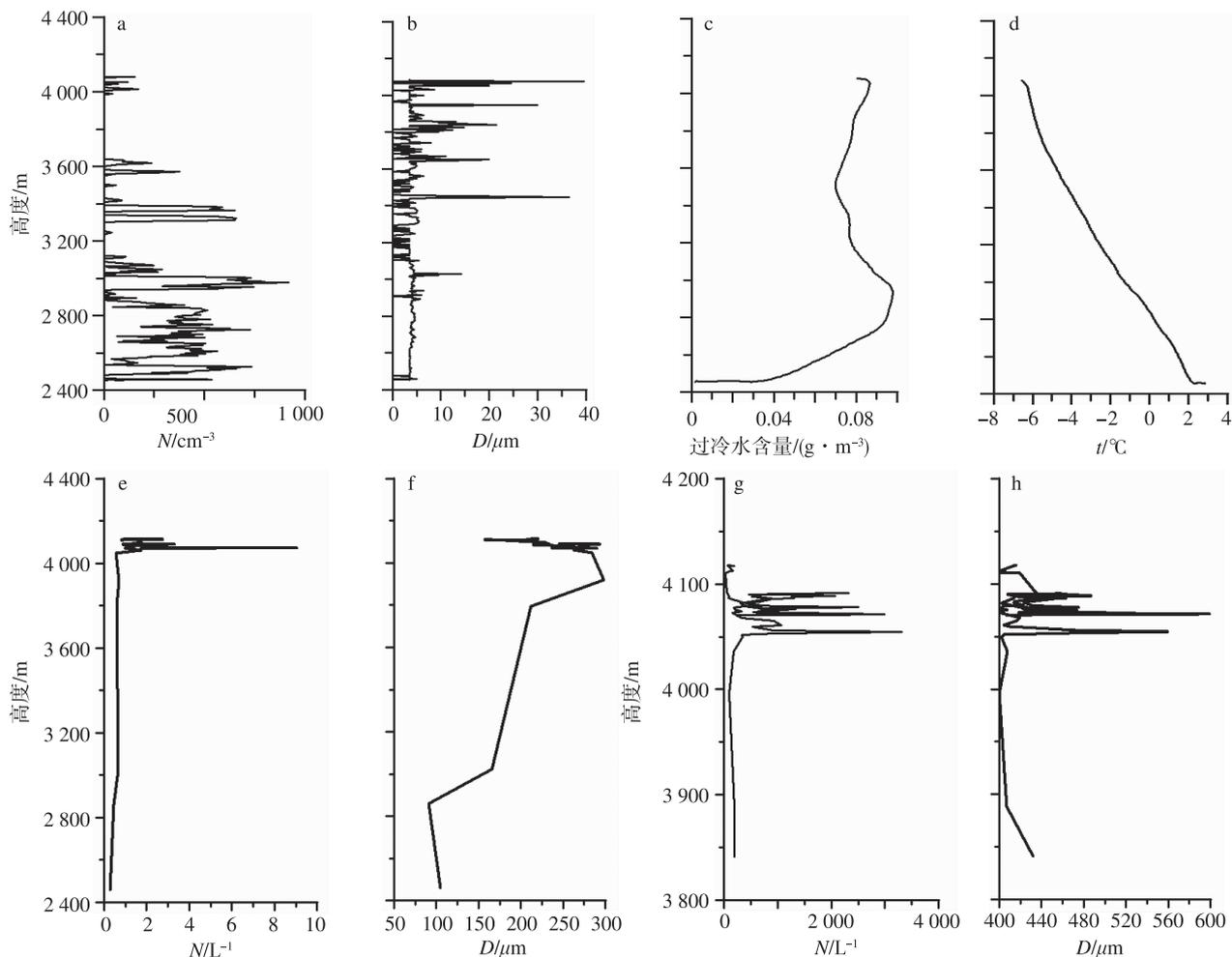


图 4 小云滴 (FSSP-100)、大云滴 (2D-C)、降水滴 (2D-P) 浓度和对应尺度及含水量随高度分布 a. 小云滴浓度; b. 小云滴尺度; c. 过冷水含量; d. 温度垂直廓线; e. 大云滴浓度; f. 大云滴尺度; g. 降水滴浓度; h. 降水滴尺度

Fig. 4 Vertical distributions of concentration and diameter of small cloud droplets (from FSSP-100), large cloud droplets (2D-C) and precipitation droplets (from 2D-P), and vertical distribution of supercooled water content a. concentration of small cloud droplets; b. diameter of small cloud droplets; c. supercooled water content; d. vertical profile of temperature; e. concentration of large cloud droplets; f. diameter of large cloud droplets; g. concentration of precipitation droplets; h. diameter of precipitation droplets

## 2.2 粒子尺度分析

图 5 给出了催化作业时和催化作业 45 min 后 2D-C、2D-P 不同尺度粒子浓度随高度的分布。2D-C 探测资料中  $N_{sum1C}$  为粒子尺度大于  $50 \mu m$  的总浓度,  $N_{sum2C}$  为粒子尺度大于  $50 \mu m$  而小于  $300 \mu m$  的总浓度,  $N_{sum3C}$  为大于  $300 \mu m$  粒子总浓度; 在 2D-P 探测资料中,  $N_{sum1P}$  为粒子尺度大于  $400 \mu m$  的总浓度。对比分析前后探测资料可明显看出,  $N_{sum3C}$  代表的粒子浓度随高度增加而增加。催化前探测最低高度至  $4100 m$  的粒子浓度主要集中在小于  $300 \mu m$  粒子段。催化 45 min 后最低高度至  $2800 m$  (接近  $0^\circ C$  层) 出现了大于  $300 \mu m$  粒子,  $2800 m$  至  $3800 m$  零星出现了  $300 \mu m$  以上的粒子,  $3800 \sim 4100 m$

云层内出现粒子浓度峰值且  $300 \mu m$  以上的粒子浓度有明显增加趋势; 此外, 2D-P 探头也开始探测到降水粒子, 可以看出大粒子浓度增加非常快。

## 2.3 催化作业前后二维粒子图像分析

图 6 给出了大云粒子 (2D-C)、降水粒子 (2D-P) 垂直分布。可以看出, 在  $4100 m$  ( $-7.8^\circ C$ ) 催化前出现较小的冰晶, 尺度小于  $100 \mu m$  的占  $91.3\%$ , 小于  $200 \mu m$  而大于  $100 \mu m$  的占  $8.64\%$ ,  $200 \mu m$  以上的粒子基本没有。  $2700 m$  ( $0.6^\circ C$ ) 冰晶融化层中, 出现较大边缘融化的霰和柱状冰晶, 说明  $0^\circ C$  以上存在较大冰晶。  $2400 m$  ( $2.8^\circ C$ ) 云中, 冰晶基本融化, 可以推断此云层冰晶融化层在  $0 \sim 2.8^\circ C$  之间温度层中。从  $4100 m$  ( $-7.8^\circ C$ ) 云顶

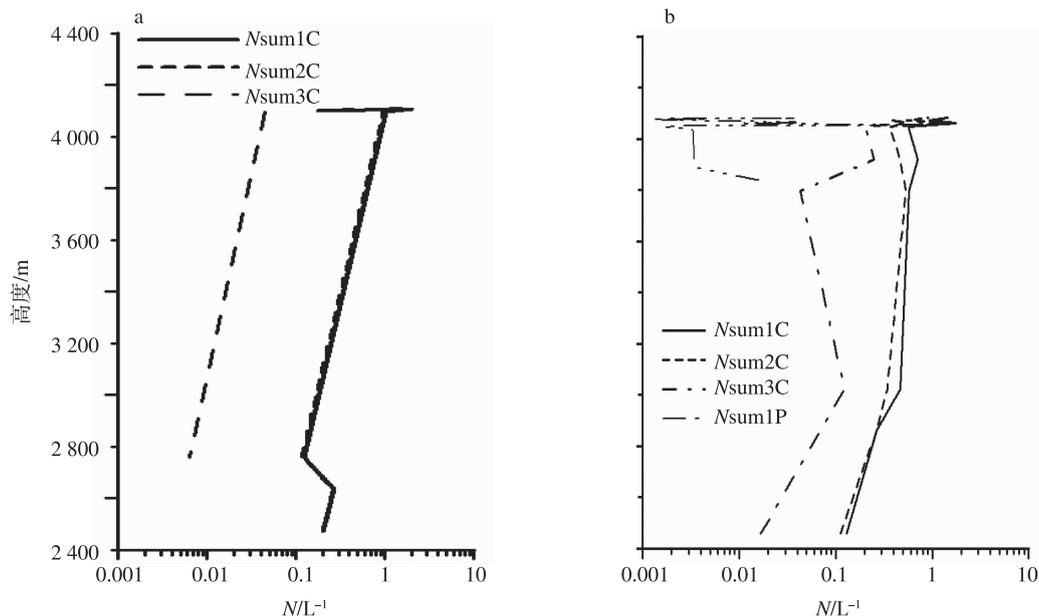


图 5 催化前(a)和催化后(b)不同尺度粒子浓度随高度的分布

Fig. 5 The vertical distribution of concentrations of different diameter particles (a) before and (b) after seeding

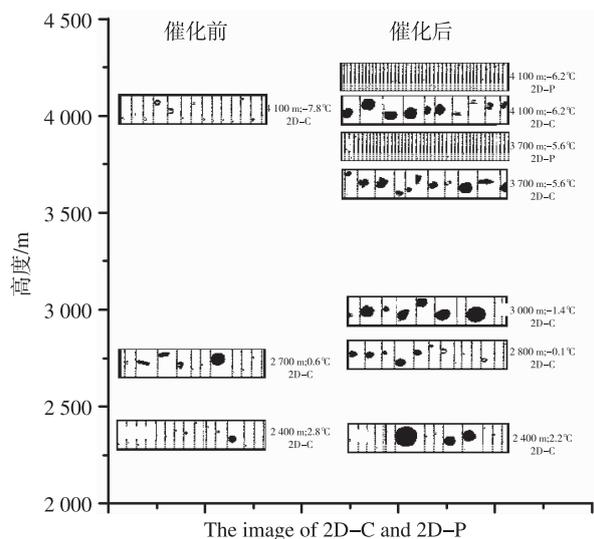


图 6 催化前后云和降水粒子垂直分布(大云粒子取自 2D-C;降水粒子取自 2D-P)

Fig. 6 The vertical distribution of cloud and precipitation droplets before and after seeding (large cloud droplets from 2D-C; precipitation droplets from 2D-P)

飞至 2 400 m (2.8 °C) 高度,探测时间约 45 min;然后螺旋上升探测,在 2 400 m (2.2 °C) 开始出现较大融化边缘的霰和冰晶,说明上层已经出现较大冰晶,以至于下落到此层还没有完全融化,影响了融化层的厚度,温度有所降低,可能是冰晶融化所致。2 800 m (-0.1 °C) 高度层以小粒子为主,小于 100 μm 的占 83.9%,大于 100 μm 而小于 300 μm 的占 16.04%,大冰晶比催化前有所增加。3 000 m

(-1.4 °C) 高度层中,大冰晶粒子所占比例明显增加,出现了大于 500 μm 的粒子。统计显示,小于 100 μm 的冰晶占 51.6%,大于 100 μm 而小于 550 μm 的占 48.3%。3 700 m (-5.6 °C) 高度中,冰晶粒子发生较大的变化,出现了较多类型的冰晶粒子,如冰晶淞附体、菱形冰晶、长方形冰晶和霰,其他类型的冰晶尺度也有所增大,小于 100 μm 的冰晶占 14.54%,大于 100 μm 而小于 400 μm 的占 85.45%,且开始出现降水粒子。4 100 m (-6.2 °C) 高度中,出现了霰、冰晶撞冻体、长方形淞附冰晶、针状冰晶和六角形冰晶等粒子,小于 100 μm 的粒子占 4.25%,大于 100 μm 而小于 400 μm 的占 95.47%,降水粒子尺度最大可达 800 μm。

综上所述,催化后,从 2 400 m 至 4 100 m 高度层中,粒子浓度随高度的变化明显,小于 100 μm 的粒子比例逐渐减小,大于 100 μm 的比例逐渐增大。从二维粒子图像上看出,在冰晶融化层附近,出现融化的边沿光滑的霰、柱状冰晶复合体、柱状冰晶体,边缘虽然融化,但冰晶的骨架基本上没有发生变化,融化霰粒子的尺度范围为 250 ~ 400 μm,最大尺度可达 550 μm。在云的上部 4 100 m (-8 °C < t < -5 °C) 催化作业层中霰、六角形冰晶、柱状冰晶复合体、针状冰晶、小冰粒子、菱形冰并粒子、小的淞附聚合体、盘子形状的冰晶和树叶状冰晶所占比例高达 80%,尺度范围主要集中在 300 ~ 400 μm,最大的粒子可达 600 μm。

## 2.4 不同高度谱分布

图 7 给出了探测云层内不同高度层中小云滴谱 (FSSP-100)、大云滴谱 (2D-C) 的分布。从 FSSP-100 探测资料 (图 7a) 可看出, 播撒时探测降水云中云滴谱型基本为单峰谱, 但在较大粒子处谱型略有起伏, 不同高度上谱宽有些差异, 在 2 400 m 至 2 700 m 的云中较宽, 在 3 000 m 至 3 300 m 的变窄, 主要是云垂直发展不均匀所造成的, 在 3 300 m 以上又出现谱宽增宽的现象, 从宏观记录中可以看出, 飞机出现中度颠簸现象, 说明此处云层发展较强。从 2D-C 资料 (图 7b) 看, 大云滴谱与小云滴谱有较明显的差别, 冰晶融化层内大云滴谱在 2 400 m 至 2 600 m 为单峰谱, 谱宽较窄为 250  $\mu\text{m}$ , 大云滴谱随着高度的增加, 在 2 700 m 出现了双峰谱, 谱宽变宽, 最大可达为 500  $\mu\text{m}$ , 主要是由融化边缘的霰粒子造成的。在 4 100 m

仍为双峰谱, 但谱宽变窄, 主要是此处接近云顶。从二维粒子图像上看, 主要是 100  $\mu\text{m}$  以下的小冰晶粒子, 其中也有少量的柱状冰晶聚合体和柱状的小冰晶粒子。

图 8 给出了播撒 45 min 后不同高度层小云滴 (FSSP-100)、大云滴 (2D-C)、降水粒子 (2D-P) 谱分布。与图 7 相比, 小云滴谱变化较小, 在 3 000 m 和 3 300 m 高度的谱宽增宽, 不同高度层谱型没有多大变化, 基本为单峰谱, 但在较大云滴处谱型略有起伏, 不同高度层的粒子浓度值有 2 个量级的变化。与图 7 相比, 较大云滴粒子谱有较大的变化, 在 2 400 m 高度处谱型变成双峰谱, 谱宽最宽可达 650  $\mu\text{m}$ , 2 400 m 以上为双峰或多峰, 峰值从小值向较大值移动。2D-P 探头在 3 840 m 至 4 100 m 云层探测到降水粒子, 谱型呈单调下降形态, 谱宽最大为 600  $\mu\text{m}$ 。

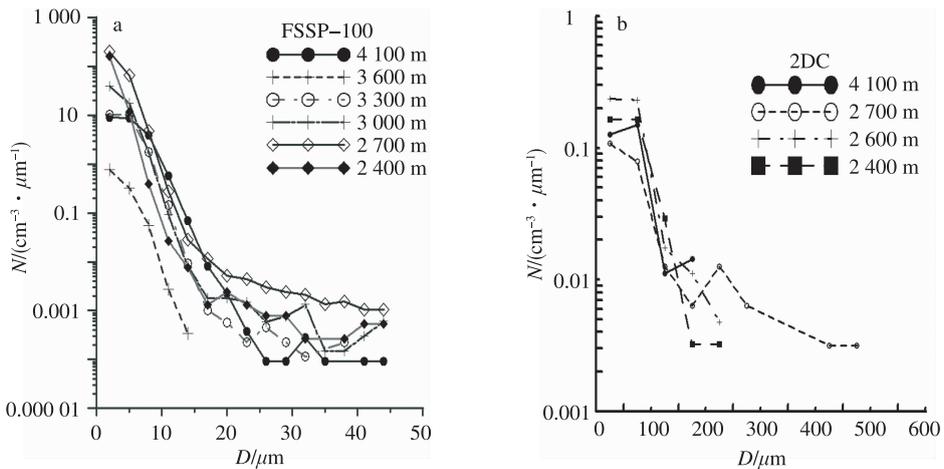


图 7 催化前不同高度层中云滴谱分布 a. 小云滴 (FSSP-100); b. 大云滴 (2D-C)

Fig. 7 The cloud droplets spectrum distribution before seeding a. small clouds droplets (from FSSP-100); b. large clouds droplets (from 2D-C)

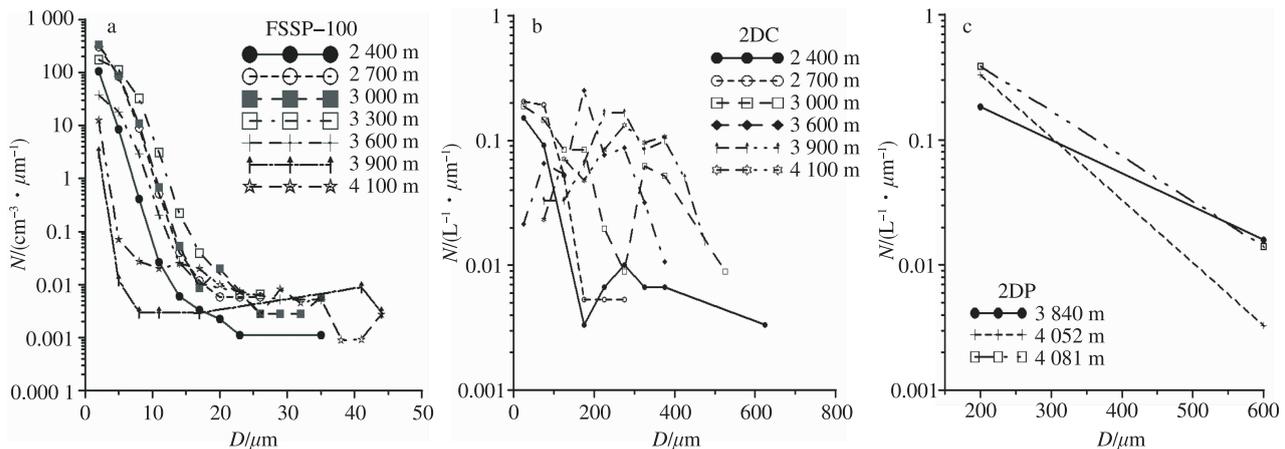


图 8 催化后不同高度层中云雨滴谱分布 a. 小云滴 (FSSP-100); b. 大云滴 (2D-C); c. 降水粒子 (2D-P)

Fig. 8 The cloud and rain droplets spectrum distribution after seeding a. small cloud droplets (from FSSP-100); b. large cloud droplets (from 2D-C); c. precipitation particles (from 2D-P)

### 3 结论

(1) 催化后,低层小云滴尺度减小,高层小云滴尺度增加,液态水含量减小,大云滴浓度减小,尺度增大,出现降水粒子,在3 700~4 000 m 高度层内小于10  $\mu\text{m}$  粒子明显增加,说明凝结过程比较明显,且10~27.5  $\mu\text{m}$  粒子开始出现,启动了云滴的碰并机制。

(2) 催化后,大粒子浓度增加,尺度增加,固态粒子类型增多。

(3) 催化前,该探测云层中小云滴谱型为单峰谱,谱宽随高度的增加先变窄后变宽;催化后,小云滴谱变化较小,基本为单峰谱,但在较大云滴处谱型略有起伏,在3 000 m 和3 300 m 高度的谱宽增宽。

(4) 催化前,大云滴谱型在云低层为单峰谱,中高层为双峰谱,谱宽随高度增加先变宽后变窄;催化后,大云滴粒子谱有较大的变化,低层变成双峰谱,谱宽最宽可达650  $\mu\text{m}$ ,中高层为双峰或多峰,峰值从小值向较大值移动。2D-P 探头在催化云高层探测到降水粒子,谱型呈单调下降形态,谱宽最大为600  $\mu\text{m}$ 。这些现象的出现是否与播撒作业有关还需要进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 王谦,游来光,胡志晋. 新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究一个例的观测结果与分析[J]. 气象学报,1987,45(1):3-12.
- [2] 樊曙先. 层状云微物理结构演变特征的个例研究[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,2000,21(2):180-182.
- [3] 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,2005,24(1):85-90.
- [4] 李照荣,李宝梓,庞朝云,等. 甘肃省秋季层状云冰雪晶粒子特征个例分析[J]. 甘肃气象,2002,20(3):21-23.

- [5] 陈万奎,马培民. 四川春季一次层状云宏微观特征和降水机制[J]. 气象科学研究所院刊,1986,6(1):54-58.
- [6] 陈万奎,游来光. 融化层附近降水粒子微物理特征的个例分析[J]. 气象科学研究所院刊,1987,10(2):144-150.
- [7] 廖飞佳,张建新,黄钢. 北疆冬季层状云微物理结构初探[J]. 新疆气象,1996,19(5):31-34.
- [8] 张连云,冯桂利. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[J]. 气象,1997,23(5):3-7.
- [9] 苏正军,刘卫国,王广河. 青海一次春季透雨降水过程的云物理结构分析[J]. 应用气象学报,2003,14(增刊):27-35.
- [10] 王杨峰,雷恒池,吴玉霞,等. 延安层状暖层云水凝物粒子的谱分布[J]. 南京气象学院学报,2005,28(6):778-793.
- [11] 黄梦宇,赵春生. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响[J]. 南京气象学院学报,2005,28(3):361-368.
- [12] Hobbs P V, Radke L R. 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]. J Appl Meteor, 1975, 14(5):805-818.
- [13] Houze R A, Hobbs P V, Herzegh P H, et al. Size distributions of precipitation particles in frontal clouds[J]. J Atmos Sci, 1979, 36:156-162.
- [14] Lo K K, Passarelli R E Jr. The growth of snow in winter storms: An airborne observational study[J]. J Atmos Sci, 1982, 39:697-706.
- [15] Gordon G L, Marwitz J D, Bradford M. Hydrometeor distributions in California rainbands[C]//Conference on cloud physics. Chicago, 1982:207-210.
- [16] Grabowski W X W, Moncrieff M. Cloud resolving modeling of tropical clouds systems during Phase III: Effects of cloud microphysics[J]. J Atmos Sci, 1999, 56:2384-2402.
- [17] Korolev A V. A study of bimodal droplet size distribution in stratiform clouds[J]. Atmospheric Research, 1994, 32(1/2/3/4):143-170.

(责任编辑:倪东鸿)