

# 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析

党娟<sup>1,2</sup> 王广河<sup>2</sup> 刘卫国<sup>2</sup>

(1. 北京大学物理学院,北京 100871; 2. 中国气象科学研究院中国气象局人工影响天气中心)

**提 要:** 对2004年6月12日甘肃河西地区一次降水性层状云的云物理飞机探测结果进行了分析,通过对云中粒子的浓度、直径、二维图像以及谱型变化地研究,并结合宏观观测记录,详细分析了云系的垂直和水平微物理特征。观测资料分析表明:此次云系为Ac-Sc结构,上层Ac云为纯冷云,下层Sc云为纯暖云,两层云之间存在较厚的干层。云中微物理量的垂直和水平变化均具有明显的不均匀性,整个探测过程中,FSSP-100所测云粒子的浓度和平均直径变化范围分别为 $0.1\sim 232.6\text{cm}^{-3}$ 和 $3.5\sim 45.5\mu\text{m}$ ,OAP-2D-GA2所测云粒子浓度及平均直径变化范围分别为 $0.01\sim 116.7\text{cm}^{-3}$ 和 $32.2\sim 995.7\mu\text{m}$ 。粒子二维图像表明,上层高积云中冰相粒子的淋附、粘连现象普遍,说明云中存在较多的过冷水。图像及谱型分析表明,6000m以上某些区域有冰晶高浓度区存在,大量冰晶的成长消耗了云中过冷水,不利于大云粒子的形成和成长;这次降水雨滴主要由纯暖性Sc云中暖云成雨过程形成,冷云过程只在Sc云顶附近有一定作用,本次降水主要机制为下层层积云中的暖云过程。

**关键词:** 微物理 飞机探测 层状云

## A Case Analysis on Microphysical Characteristics of Summer Stratiform Cloud in Gansu Province

Dang Juan<sup>1,2</sup> Wang Guanghe<sup>2</sup> Liu Weiguo<sup>2</sup>

(1. School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. Weather Modification Centre of CMA, Chinese of Meteorological Sciences)

**Abstract:** The cloud microphysical data measured by the airborne PMS probes in a precipitating stratiform cloud on June 12, 2004 in Hexi Corridor region of Gansu Province are analyzed. The cloud microphysical characteristics in both horizontal and vertical direction are presented through analyzing number concentration, mean diameter, shape and size distribution of cloud particles sampled with FSSP-100 probe and OAP-2D-GA2 probe. The results show that the cloud is Ac-Sc configuration, and dry layer between Ac and Sc clouds is deep. Both vertical and horizontal varieties of cloud microphysical parameter show obviously

资助项目: 国家科技支撑计划重点项目(2006BAC12B04)专题

收稿日期: 2008年6月24日; 修定稿日期: 2008年10月20日

inhomogeneous features. The cloud particle number concentration measured by FSSP-100 changes from  $0.1\text{cm}^{-3}$  to  $232.6\text{cm}^{-3}$ , and the mean diameter is around  $3.5\sim 45.5\mu\text{m}$ . The change scopes of corresponding data explored with OAP-2D-GA2 are respectively  $0.01\sim 1167\text{L}^{-1}$  and  $32.2\sim 995.7\mu\text{m}$ . The particle images indicate that the riming, accretion and aggregation of ice and snow crystals are quiet universal, and it shows that the super-cooled water content in cloud is high. There are high concentration regions above 6000m altitude. Growth of massive ice crystals consumes largely the super-cooled water, sequentially restraining the production or growth of big particles. The cool cloud processes are dominant during precipitation, and warm cloud processes is not distinct in Sc cloud.

**Key Words:** microphysics aircraft observation stratiform cloud

## 引 言

甘肃省地域狭长,境内地形复杂,其降水多受新疆东移的冷空气和青藏高原上的西南暖湿气流的单独或共同影响形成层状云系或混合云系,产生范围较大的稳定性降水,由于甘肃省地处干旱地区,开展层状云人工增雨作业是缓解干旱状况的重要途径之一,因此系统研究甘肃省降水性层状云的宏微观结构以及降水机理,有利于提高层状云人工增雨作业的科学性有效性。目前,对于西北地区层状云降水已开展了较多的研究<sup>[1-8]</sup>,但专门针对甘肃省层状云的微物理结构特征的研究较少,且大多从数值模式角度进行分析<sup>[6-7]</sup>,李照荣等<sup>[8]</sup>对兰州地区秋季层状云的微物理资料进行了综合研究,详细分析了较为典型的 Cs-As-Ns 和 Ac-Sc 层状云系的垂直微物理特征。

本文选取 2004 年 6 月 12 日甘肃河西地区一次降水性层状云的飞机探测资料,分析了云系的宏观特征,详细讨论了垂直和水平方向云粒子的浓度、平均直径、二维图像、谱型分布等云微物理特征,以期从微物理角度了解本次层状云降水的主要结构及降水主要机制。

## 1 探测仪器简介

本次探测使用的飞机是改装的 An-26 型增雨探测飞机,机上装有美国 PM 公司的 PMS 粒子测量系统,其采样探头包括前向散射粒子谱探头 FSSP-100、前向散射粒子谱量程扩展探头 FSSP-ER 和二维灰度云粒子探头 OAP-2D-GA2(以下简称为 2D-GA2),分别安装在飞机两侧的机翼下方,由于 FSSP-100 和 2D-GA2 安装在飞机的同一侧机翼下,因此观测数据相关性较好,因此本文主要分析这两个探头的观测数据。飞机上安装的其他探测仪器还包括机载 GPS 系统和机载温湿仪,分别提供飞机航迹、飞行高度、空速以及温湿度等数据信息。

FSSP-100 和 2D-GA2 均可测量云中粒子的直径、浓度、谱型等特征,此外 2D-GA2 还可获取云中粒子的二维灰度图像信息,根据粒子挡光度( $>25\%$ ,  $>50\%$ 和 $>75\%$ )的不同<sup>[9]</sup>,二维粒子划分为不同的灰度等级,在彩色图像上依次以红、蓝、绿代表三种不同的等级。FSSP-100 共有 4 个量程,涵盖的云粒子直径范围为  $0.5\sim 47\mu\text{m}$ ,本次探测采用 0 量程,相应的测量范围为  $2\sim 47\mu\text{m}$ ,均分为 15 个测量通道;2D-GA2 为固定量程,其测量

的粒子直径范围为  $25 \sim 1550 \mu\text{m}$ , 划分为 62 个测量通道, 但它实际可探测到  $17.75 \sim 1562 \mu\text{m}$  的粒子; 2D-GA2 各测量通道的取样面积并不完全相同。

## 2 云系特征及探测概况

受来自青藏高原的西南暖湿气流影响, 2004 年 6 月 12—13 日甘肃中东部地区出现一次弱的降水过程, 其中河西地区 24 小时最大降水量  $7\text{mm}$  (13 日 08 时)。由 12 日 16 时的卫星云图(图 1a)可看出, 云系主要位于甘肃中东部地区, 以层状云为主。飞机宏观观测记录表明, 云系呈现多层结构, 但主要分为两层, 属 Ac-Sc 云系结构, 上层为高积云 (Ac), 下层为层积云 (Sc), 在两层云之间, 有时会有范围不大的若干薄层云存在。根据飞机起飞段的观测数据, 下层 Sc 云云底高度在  $2660\text{m}$  (海拔高度, 下同) 左右, 温度  $8.0^\circ\text{C}$ , 云顶高度  $4458\text{m}$ , 温度  $2.2^\circ\text{C}$ ; 上层 Ac 云云底高度  $5882\text{m}$ , 温度  $-3.6^\circ\text{C}$ , 由于升限所限, 飞机未达此云云顶, 但根据宏观观测记录知, 飞机在  $6270\text{m}$  以上时, 机舱外天色开始变亮, 说明此时飞机已在云体的上部, 由此判断云层厚度可能在  $500\text{m}$  以上。此外, 飞机在上层 Ac 云中飞行时, 可以观察到机翼有积冰现象 (最厚时目测约  $2.0\text{cm}$ ), 说明云层中有较多的过冷水存在。

本次飞行探测区域为甘肃省河西地区, 飞机起飞时, 本场天气为阴, 地面有零星小雨, 飞机降落时, 本场天气为阴, 无降水。2004 年 6 月 12 日 15 时 30 分 (北京时, 下同) 左右, 飞机从兰州中川机场起飞, 经中川、景泰、武威、永昌、山丹一线 (图 1b) 探测飞行, 于 18 时 27 分降落。整个探测过程中, 探测的高度范围为  $1959 \sim 6285\text{m}$ , 探测温度区间为  $13.9 \sim -6.8^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$  层高度为  $4940\text{m}$ ; FSSP-100 观测到的云粒子最大浓度为  $232.6 \text{cm}^{-3}$ , 最大直径 (平均直径, 下同) 为  $45.5$

$\mu\text{m}$ ; 2D-GA2 观测到的云粒子最大浓度  $116.7 \text{cm}^{-3}$ , 最大直径为  $995.7 \mu\text{m}$ 。

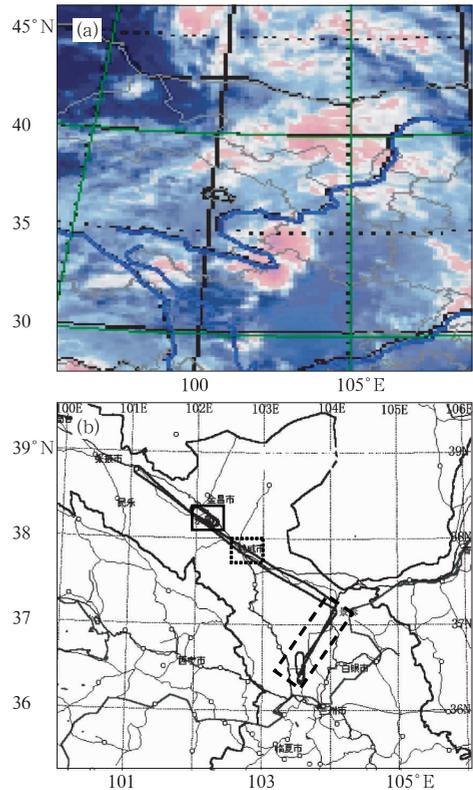


图 1 2004 年 6 月 12 日 16 时卫星云图 (a) 和探测飞机飞行轨迹 (b)  
(b) 中长虚线框所围为飞机起飞段轨迹, 点虚线框为平飞 1、2 段的大致轨迹, 实线框为平飞 3、4 段的大致轨迹

## 3 观测数据分析

### 3.1 观测数据处理及统计

本文将 FSSP-100 探头的数据分为两档:  $2 \sim 23 \mu\text{m}$  和  $23 \sim 47 \mu\text{m}$ ; 将 2D-GA2 探头的数据分为四档:  $17.75 \sim 67.25 \mu\text{m}$ ,  $67.25 \sim 215.25 \mu\text{m}$ ,  $215.25 \sim 1012.5 \mu\text{m}$  和  $1012.5 \sim 1562.0 \mu\text{m}$ 。根据云微物理学对云粒子的划分规则, FSSP-100 探头的第 1、2 档和 2D-GA2 的第 1、2 档涵盖云滴、冰晶; 2D-GA2 第 3、4 档则涵盖小雨滴、冰雪晶, 小霰粒等。

本文对云中的粒子谱特征也进行了分析。由于 FSSP-100 和 2D-GA2 两探头测量

通道的分档间隔不同,因此做出的粒子谱相互之间缺乏比较性,应此在分析二者谱型时进行了归一化处理,即将各通道所测粒子浓度除以各自通道的分档间隔,从而得到单位直径间隔下的粒子浓度。做上述处理后,两探头的谱资料即可进行相互比较。

此次探测没有实测的含水量数据,文中呈现的含水量数据是根据 FSSP-100 探头所测数据计算出的含水量,其中最大含水量对应的探测高度为 6221m,温度-6.0℃,粒子浓度和直径分别为 197.2cm<sup>-3</sup>和 15.4μm。由于 FSSP-100 在探测中无法区分云滴和冰相粒子,其计算含水量时会将探测到的云滴和冰相粒子一同进行计算<sup>[10]</sup>,因此当云中含有冰相粒子时,由 FSSP-100 的探测数据计算出的含水量实际反应的是探头测量范围内的云中液态和固态粒子的总水量。

表 1 列出了本次观测中 PMS 系统各探头所测得的云粒子的一些微物理特征。由表

中可看出,此次探测,FSSP-100 和 2D-GA2 探头均探测到了较大的粒子浓度,探测到的最大浓度分别为 232.6cm<sup>-3</sup>(3773m,4.8℃,9.9μm)和 116.7cm<sup>-3</sup>(6244m,-6.1℃,38.3μm)。值得注意的是 2D-GA2 在 6000m 以上某些区域,有时测得的粒子浓度达到 102cm<sup>-3</sup>量级,与其他文献的观测对比<sup>[11]</sup>,量级偏大。由 2D-GA2 二维图像可知,此时观测到的图像中绝大部分为形状不可分辨的细小粒子,2D-GA2 第 1 测量通道(17.5~42.5μm)的浓度为 85.5cm<sup>-3</sup>,相应时刻的 FSSP-100 探头第 7~13 通道(17~41μm)的粒子浓度为 61.5cm<sup>-3</sup>,二者观测数据是比较一致的,而且此时 FSSP-100 粒子谱中有第二、三峰值出现,这说明云滴和冰晶并存<sup>[12]</sup>,因此可以推断探测到此高粒子浓度的原因可能是由于云中大量云滴和尚未长大的小冰晶所造成的。

表 1 云系微观特征观测统计

| 采样探头     | 浓度范围/cm <sup>-3</sup>                     | 平均浓度/cm <sup>-3</sup> | 直径范围/μm    | 直径平均值/μm | 含水量范围/g·m <sup>-3</sup> | 平均含水量/g·m <sup>-3</sup> |
|----------|---|-----------------------|------------|----------|-------------------------|-------------------------|
| FSSP-100 | 1×10 <sup>-1</sup> ~2.326×10 <sup>2</sup> | 1.989×10 <sup>1</sup> | 3.5~45.5   | 17.8     | 0.001~0.656             | 0.045                   |
| 2D-GA2   | 1×10 <sup>-3</sup> ~1.167×10 <sup>2</sup> | 4.583×10 <sup>0</sup> | 32.2~995.7 | 141.3    | —                       | —                       |

### 3.2 微物理量垂直分布特征

图 2 给出了飞机起飞爬升阶段所测一些

参量的垂直分布,为便于看清云中物理量的变化趋势,图中给出的都是经 6s 滑动平均后得到曲线。由图中粒子浓度、直径及含水量

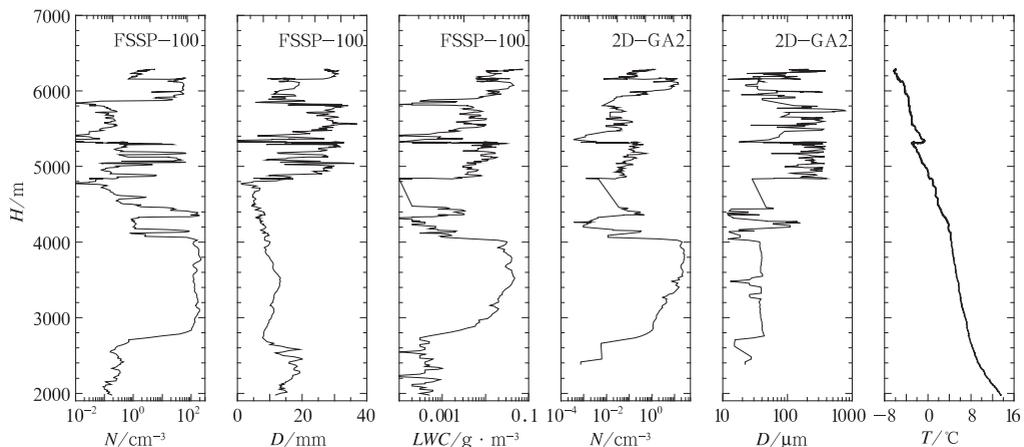


图 2 机载仪器所测云粒子浓度、直径、温度随高度的变化(6s 平滑数据)。图中 N 为数浓度,D 为平均直径,LWC 为 FSSP-100 的计算含水量,T 为温度,H 为海拔高度。

的垂直分布可看出,云系有分层现象,与宏观观测一致,但准确的判断云底及云顶高度,还需参考 FSSP-100 的粒子谱型。游来光<sup>[12]</sup>研究指出,根据 PMS 数据判断是否在云内,不能单纯依靠粒子浓度,还需参考粒子谱型的特征;根据云粒子谱型随高度的连续变化,可以确定粒子谱型突发性变宽的高度为云底高度,该结论主要是根据 FSSP-100 探头的 2、3 量程(测量范围分别为  $0.5 \sim 8\mu\text{m}$  和  $1 \sim 16\mu\text{m}$ )得出的,由于本次探测采用 0 量程,因此我们结合宏观观测记录确定:FSSP-100 第 1~4 测量通道( $2 \sim 14\mu\text{m}$ )有连续测值时,可认为是云区;在冷云区会出现谱型向大粒子端平移的现象,此时 1~4 测量通道可能没有测值,但其后续测量通道则有较宽的连续测值,此时也认为是在云区。据此标准,根据图 2 并结合 FSSP-100 所测粒子谱型,确定了垂直方向不同云层的高度范围。

$0^\circ\text{C}$  层以上主要为 Ac 云,云底高度 5882m,厚度超过 500m。由图 2 可看出,该云层的微物理特征分布具有明显的不均匀性,在 Ac 云以下约 5000 至 5300m 之间为飞机在爬升阶段穿过的多层薄云,其厚度均不大,且均为纯冷云。

$0^\circ\text{C}$  层以下 2660~4458m 为一深厚的纯暖性云层(Sc 云),由图 2 可见,该云层微物理量的垂直分布较为均匀,只是在云顶附近有较为剧烈的变化。整个云层中,FSSP-100 所测云滴浓度 58% 以上大于  $90\text{cm}^{-3}$ ,平均值为  $91.2\text{cm}^{-3}$ ; 2D-GA2 所测粒子浓度 66% 小于  $10\text{cm}^{-3}$ ,平均值  $9.04\text{cm}^{-3}$ 。

Ac 云与 Sc 云之间主要存在两个干层,两千层被几层薄云分开。5300~5882m 之间为纯冷性干层,Sc 云顶以上至 4998m 为另一干层。表 2 列出了各层次所探测微物理量统计数据。

表 2 飞机起飞段不同层次探测数据统计

| 云层   | 高度范围/m    | FSSP-100             |                     | OAP-2D-GA2           |                     |
|------|-----------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|      |           | 浓度/ $\text{cm}^{-3}$ | 平均直径/ $\mu\text{m}$ | 浓度/ $\text{cm}^{-3}$ | 平均直径/ $\mu\text{m}$ |
| As 云 | >5882     | 0.4~64.0             | 7.5~32.0            | 0.022~18.0           | 33.5~760.9          |
| 上层干层 | 5300~5882 | 0.0~0.8              | 0.0~45.5            | 0.0~0.29             | 80.0~995.7          |
| 下层干层 | 4458~4998 | 0.0~3.9              | 0.0~30.5            | 0.0~0.128            | 0.0~608.2           |
| Sc 云 | 2660~4458 | 0.5~232.6            | 5.4~14.0            | 0.001~34.0           | 35.0~328.3          |

为便于详细分析云的微物理特征,图 3、图 4 展示了分档后云粒子浓度的垂直变化。As 云为冷云,其微物理特征较为复杂。由图 3、4 可知,小于  $215.25\mu\text{m}$  的云粒子段,在云底至约 6160m 处浓度呈递增趋势,特别是大于  $23\mu\text{m}$  的粒子段,这种趋势更为明显,其浓度明显比小于  $23\mu\text{m}$  的粒子段要高。大于  $215.25\mu\text{m}$  的降水粒子段变化趋势不同,在该区域范围内,2D-GA2 第 3、4 档粒子浓度变化呈先递增然后递减的趋势,峰值在云底附近约 5980m 处。两探头各档的粒子浓度在略低于 6200m 高度附近均有一低值区存在,其中以小于  $20\mu\text{m}$  的粒子浓度下降最为剧烈,此后各档粒子浓度随高度增加再次呈递增趋势。

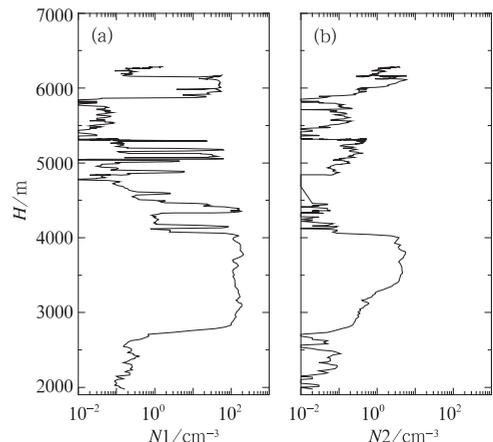


图 3 FSSP-100 探头所测分档云粒子浓度随高度的变化(6s 平滑数据)  
图中 N1 为第 1 档粒子数浓度,  
N2 为第 2 档粒子数浓度

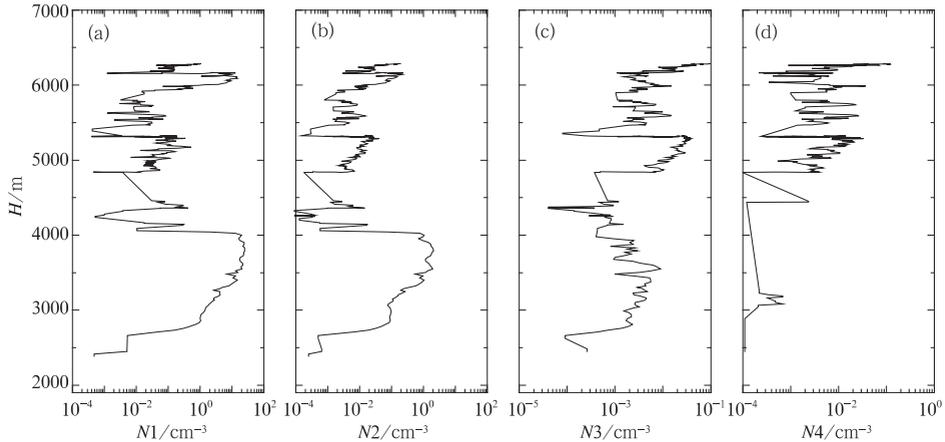


图 4 2D-GA2 探头所测分档粒子浓度随高度的变化(6s 平滑数据)  
图中 N1、N2、N3 和 N4 分别为第 1、2、3、4 档粒子数浓度

As 云下的干层中,仍可观测到一定浓度的云粒子和降水粒子,这些粒子应当是由上层云区落下的。其中云粒子的浓度明显低于其上层云水区的浓度,而降水粒子的浓度有时同云区中降水粒子浓度量级相当。在 5300~5500m 高度范围,云粒子和降水粒子浓度均急剧下降,大部分粒子在此层中被蒸发耗尽,其下的多层薄云中,粒子浓度又有所增加,但随高度下降而递减。Sc 云顶至 4800m 之间,2D-GA2 和 FSSP-100 均没有探测较大的云粒子和降水粒子,大部分下落的冰相粒子到达此层时已基本被消耗殆尽。

Sc 云中,大云滴(FSSP-100 第 2 档、2D-GA2 第 1、2 档)在云体中上部(约 3400m 以上)有较高浓度,而且它们的浓度量值明显高于上层冷云。而对与 Sc 云中降水粒子段(2D-GA2 第 3、4 档),第 3 档内的粒子在云中部约 3600m 处浓度达到峰值,然后向下呈递减趋势,第 4 档内的粒子主要聚集在 3100~3200m 区域内,直径在 1000~1300 $\mu\text{m}$  之间,其他区域几乎没有观测到数据。无论第 3 档还是第 4 档的降水粒子浓度,相比上层冷云都要偏小,在峰值浓度上相差 6 倍到一个量级,特别是大于 1000 $\mu\text{m}$  的更为明显,相差 1 到 2 个量级。大云滴及降水粒子的分布特征表明,Sc 云中暖雨过程起到较为重要的

作用。

由上述分析,无论是暖云还是冷云,微物理特征的垂直分布均具有不均匀性,但相对而言,上层冷云的不均匀性更为明显,粒子浓度和尺度的起伏变化更为频繁剧烈。研究表明<sup>[13]</sup>,上层冷云中冰相粒子落入下层暖云,对下层暖云云水形成冲刷作用,有利于增加降水。由前述分析可知,可是由于上下两层干层合计厚度可达 1000m 以上,而且两干层均探测到下落粒子的低浓度区,说明它们在很大程度上抑制了上层冷云中冰雪晶粒子下落进入低层暖云,不利于降水的增加,这说明冷云过程在此次降水过程中没有显著贡献,降水可能主要由 Sc 云中的暖云过程形成,这是本次降水较小的重要原因之一。

图 5 为起飞段不同高度处 2D-GA2 所测云粒子二维图像。需要指出的是,显示的粒子二维图像和粒子实际浓度并不一定匹配,这和仪器的工作原理相关。探测过程中,图像和计数数据都会暂时存储在仪器的寄存器中,因为图像存储需要较大空间,寄存器满后,需要将图像数据转出寄存器,在此期间,如果有新的粒子进入有效采样区的话,其图像数据是不会被记录的,但有效粒子的数目和直径则仍被计数器记录,当仪器能够记录新的粒子图像时,这些计数会被转出计数器。

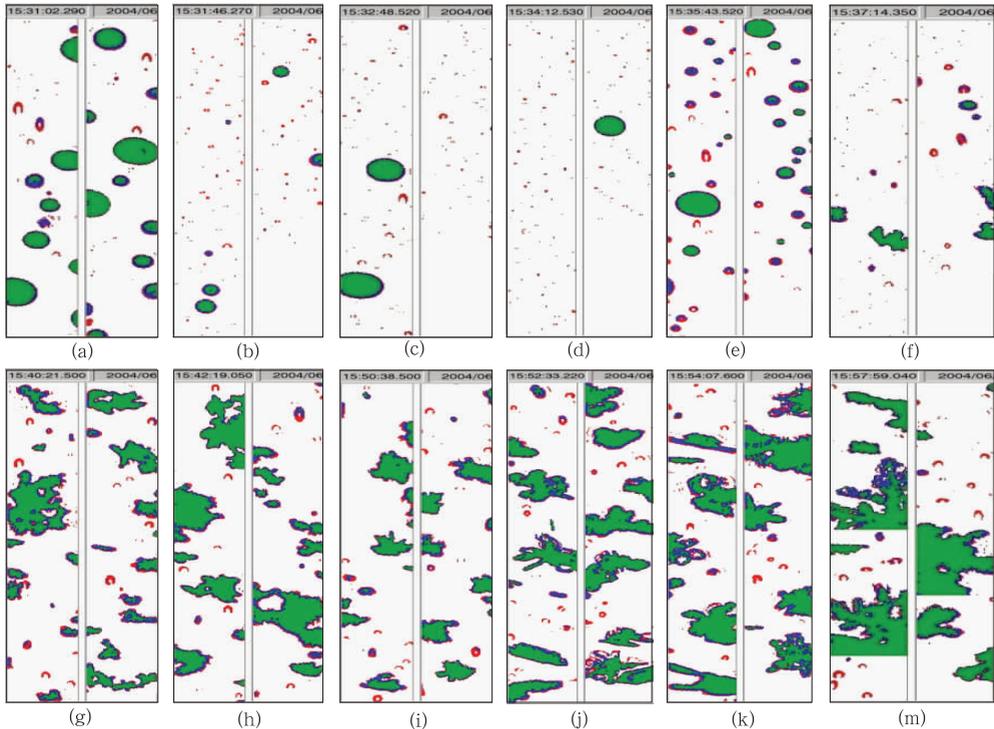


图 5 2D-GA2 探头所测不同高度处云粒子二维图像

a. 2468m, 9.0°C; b. 2759m, 7.6°C; c. 3177m, 6.3°C; d. 3813m, 4.7°C;  
e. 4244m, 3.8°C; f. 4399m, 2.5°C; g. 4839m, 0.3°C; h. 5113m, -1.3°C;  
i. 5475m, -2.1°C; j. 5722m, -3.3°C; k. 5914m, -3.6°C; l. 6207m, -5.8°C

由粒子二维图像知,在云下有降水,可观测到雨滴(图 5a),云底附近多为小雨滴(图 5b),在 3177m 处可观测到较大雨滴(图 5c),这与前述分析一致(图 4d)。二维图像表明,在 Sc 云的不同部位均可观测到雨滴存在(图 5b—f),说明云中云水转化过程已启动。图 5f 为 Sc 云顶 4399m 处观测到的云粒子,其中仍有尚未完全融化的冰雪晶粒子,在图 4c 中可以看到 4100~4300m 的范围内降水粒子浓度明显增加,相应的在图 5e 中也观测到了较多的雨滴,由此可推断这些雨滴可能主要是由冰雪晶粒子融化而来,即主要由冷云过程产生。但在 4100m 以下,降水粒子浓度明显减少,4000m 以下浓度才开始逐渐回升,由前述分析可知,这时主要是暖云过程在起作用,也即冷云过程只在 Sc 云顶附近起到一定作用。

图 5g 为下层干层中观测到的粒子图像,由图中可看到冰晶粒子间粘连聚合现象较

多,大尺度的聚合体不多。图 5h 为下层冷云中观测到的粒子,冰晶粒子依然存在着粘连聚合现象,大尺度的冰晶聚合体较多。图 5i、图 5j 为上层干层处的粒子图像,冰雪晶粒子存在明显的凇附冻结痕迹,粘连较少,有锥状霰粒出现(图 5h)。图 5k、图 5m 为最上层冷云云底及中上部所测的粒子图像,可以看出,由于温度较低,粒子形状相对清晰,但仍有凇附的痕迹,部分粒子有粘连现象(图 5k),在图 5m 中还可以清楚看到较大的枝星状雪晶的部分图像。

由粒子图像的垂直特征可知,在冷云中,大部分冰雪晶粒子边缘存在明显的凇附现象,说明云中存在较多的过冷水,而且各层均存在冰雪晶的粘连聚合现象,有利于形成较大的冰雪晶粒子。然而,由前述分析知,由于干层的阻碍,降落到 Sc 云中的降水粒子只是少数,虽然在 Sc 云上部形成的了一定的冷云过程,但没有对此次降水产生主要影响,Sc

云中仍以暖云过程为主,也即此次降水中冷云过程没有起到主要作用,降水主要由 Sc 云中暖云成雨形成。

图 6 为不同高度处 2D-GA2 和 FSSP-100 所测得的粒子谱。图中 a 线(图 6a)所示

为 Sc 云下观测到的滴谱,呈单调下降分布,谱型较宽,最大粒子直径达  $1075\mu\text{m}$ ,由谱型看出, $300\mu\text{m}$  后粒子浓度有增加趋势,反应出云下有较多雨滴出现的情况。

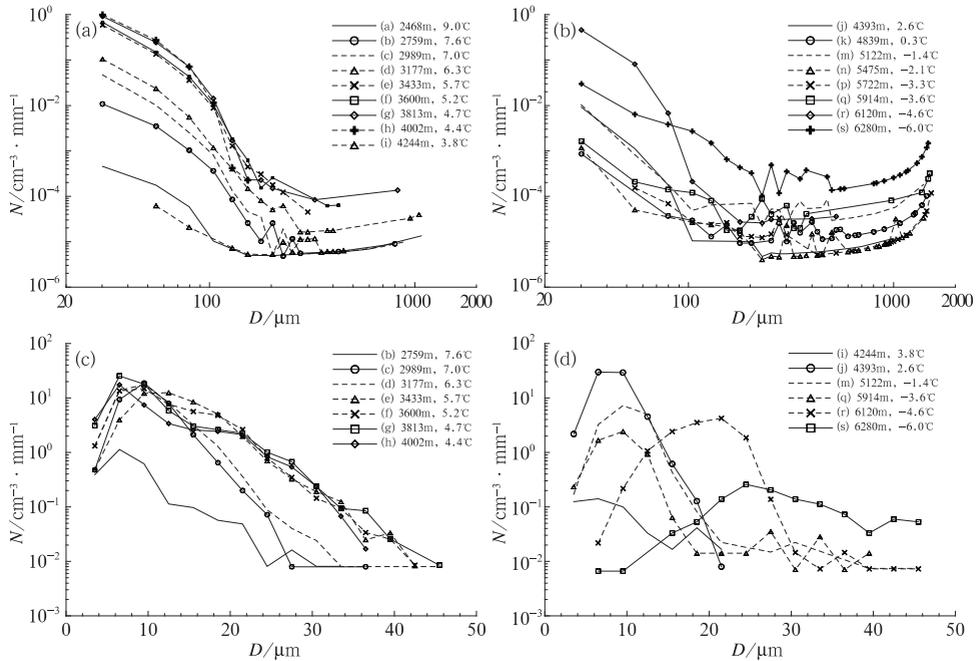


图 6 2D-GA2 和 FSSP-100 所测不同高度处的粒子谱型

a, b 所示为 2D-GA2 所测谱型, c, d 所示为 FSSP-100 所测谱型各图中线号相同的谱线为同一高度所测

图 6 中 b 至 j 线为 Sc 云中不同部位的粒子谱型。图 6 中 i, j 线为 Sc 云顶附近所测粒子谱型,由于云顶附近夹卷蒸发等作用,云滴浓度较低,谱型变窄(图 6d)。j 线所在高度仍有尚未完全融化的冰雪晶粒子(图 5d),因此在 2D-GA2(图 6b)所测谱形很宽。e 线与 f 线不同,由图 4 知,在此高度上,云滴及大于  $1000\mu\text{m}$  的粒子浓度均很小,因此 e 线谱宽比 f 线要窄的多。

b 至 h 线分别为 Sc 云底、云下部、中部和上部的粒子谱,可以看出各谱的合成谱(FSSP-100 和 2D-GA2)谱型均属单峰型,峰值直径大多在  $6\sim 12\mu\text{m}$  之间,各谱的浓度值随高度增加而增加。d 线位于  $3177\text{m}$  高度,由图 4d 知,此高度为  $1000\mu\text{m}$  以上粒子富集区,图 6a 中的 d 线也具有最宽的谱宽。e、f

和 g 各谱浓度接近,谱形宽,且 FSSP-100 谱型大于  $20\mu\text{m}$  段及 2D-GA2 谱段的粒子浓度量值明显高于 Sc 云中其他高度,说明在此高度层内,存在大云滴及降水粒子浓度峰值区,云粒子的凝结、碰并增长作用较强,而考察更高高度的 h 线谱型可知,2D-GA2 的谱宽很窄, $200\mu\text{m}$  以上没有观测到降水粒子,结合前述分析(图 4)可知, $4000\text{m}$  以下暖云成雨过程具有重要作用。

图 6b 中 k, n 和 p 线均为干层中所测粒子谱型,它们均具有多个峰值及较宽谱型的特点,由于主要是从上方云层落下,因此其浓度量值均低于它们对应的上层云层中浓度。

图 6b、图 6d 中的 m, q, r 和 s 线为两层冷云中所测粒子谱。由图中可看出,两探头探测的谱形均很宽;其中 FSSP-100 谱型具

有双峰特征,第二峰值的直径在  $26\mu\text{m}$  以上,这是冰晶粒子存在的特征之一<sup>[12]</sup>;2D-GA2 所测数据由于大粒子段浓度较低,观测随机性较强,造成在大于  $100\mu\text{m}$  谱段谱形起伏变化剧烈,但总体而言在低于  $600\mu\text{m}$  的谱段基本呈单调下降变化,大于  $600\mu\text{m}$  时粒子浓度有上升趋势,  $1000\mu\text{m}$  以上浓度增加更为剧烈。上述谱形特征说明在冷云中粒子尺度分布复杂,降水粒子有明显成长,由二维图像上(见图 5)也可看出此时粒子形态多变,主要包括云滴、冰晶、小雨滴、霰粒、冰晶聚合体、雪晶等。

上层冷云中  $q$ 、 $r$  线的变化说明了在该云层范围内云粒子的变化,小于  $200\mu\text{m}$  的粒子浓度随高度增加(参见图 6b、d),与前述分析一致,而且 FSSP-100 谱形峰值明显右移,说明粒子尺度也随高度变大(图 6d)。大于  $200\mu\text{m}$  的粒子浓度在 6120m 处浓度明显低于其下层的粒子浓度,2D-GA2 的谱宽小于

$700\mu\text{m}$ ,图 3、4 以及二维图像均表明该区域主要为细小粒子,大粒子较少。由观测数据可知,此时 2D-GA2 所测粒子浓度达到  $13.6\text{cm}^{-3}$ ,FSSP-100 所测浓度为  $40.6\text{cm}^{-3}$ ,而且此高度处的云中其他区域 2D-GA2 也多次观测到很高的粒子浓度(参见 3.1 部分及表 1);由上述谱型特征与观测数据推断,此处有大量小冰晶粒子存在,其尺度多在  $18\sim 24\mu\text{m}$  左右,由于大量冰晶的凝华成长消耗了水汽,使得此区域蒸发作用变强,造成云滴蒸发,过冷液水含量降低(贝基隆过程),抑制了大粒子的产生和增长,造成垂直方向出现大粒子的“断层”(图 2、3、4)。

### 3.3 微物理量水平分布特征

飞机水平探测在  $0^\circ\text{C}$  层以上进行,平飞探测表明,同垂直方向微物理量分布的不均匀性类似,水平方向云中微物理量的分布也表现出明显的不均匀性。图 7 给出了飞机在

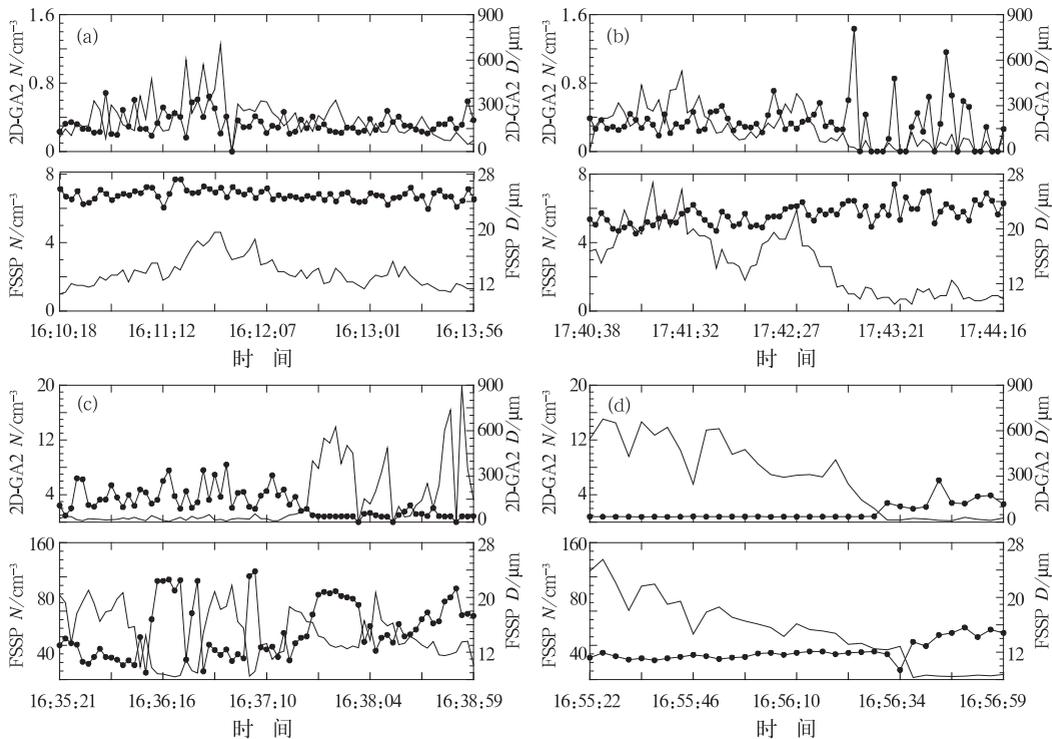


图 7 飞机不同高度处平飞时 2D-GA2 和 FSSP-100 所测粒子浓度、直径随时间的变化。  
图中实线为浓度,点线为平均直径 a. 平飞段 1, b. 平飞段 2, c. 平飞段 3, d. 平飞段 4

不同高度云层中平飞时探测结果随时间的变化,由图中可看出,粒子浓度和直径均有较大起伏变化,但在不同平飞段浓度和直径的量级及变化幅度又有所区别,如平飞段1、2的粒子浓度量级及变化均比平飞段3、4要小, FSSP-100所测粒子直径变化以平飞段3最为剧烈,而2D-GA2所测粒子直径变化量级则以平飞段2最大,云粒子浓度的水平变化

说明,即使在云层水平方向,不同区域的粒子生成条件也是有区别。此外从两探头探测数据的相关性来看,平飞段2、4中两探头所测数浓度有很好的正相关,平飞段1、3相关性则较差。各平飞段平均特征参见表3给出的各平飞段所测参量的对比,各平飞段对应的探测区域参见图1。

表3 飞机平飞段云中探测数据统计

| 平飞段序号 | 高度/m      | 温度/°C     | FSSP-100                 |           |                             |              | 2D-GA2                   |            |                             |              |
|-------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|--------------------------|------------|-----------------------------|--------------|
|       |           |           | 数浓度/<br>cm <sup>-3</sup> | 直径/<br>μm | 数浓度平均值/<br>cm <sup>-3</sup> | 直径平均值/<br>μm | 数浓度/<br>cm <sup>-3</sup> | 直径/<br>μm  | 数浓度平均值/<br>cm <sup>-3</sup> | 直径平均值/<br>μm |
| 1     | 6264~6277 | -5.7~-5.4 | 1.0~4.6                  | 22.9~27.2 | 2.3                         | 24.9         | 0.08~1.3                 | 91.4~385.5 | 0.4                         | 185.5        |
| 2     | 5988~6000 | -4.8~-4.2 | 0.4~7.5                  | 19.3~26.5 | 2.8                         | 22.1         | 0.02~0.9                 | 82.4~805.9 | 0.3                         | 187.4        |
| 3     | 5736~5774 | -3.6~-2.6 | 3.2~110.0                | 9.0~23.8  | 51.5                        | 15.4         | 0.1~20.0                 | 35.5~377.8 | 3.0                         | 121.0        |
| 4     | 5198~5217 | -1.3~-0.9 | 2.3~140.2                | 9.4~15.6  | 54.0                        | 12.2         | 0.2~15.1                 | 34.3~274.9 | 6.6                         | 68.1         |

图8给出了各平飞段所测得的一些典型的二维粒子图像。平飞段1整个时间段中主要由一些霰粒、淞附的雪晶及少量柱状冰晶

组成,此段中霰粒形状多为近似圆形且粒径较小,说明这些霰粒可能尚在成长初期<sup>[14]</sup>,较大的形状不规则的霰粒则主要由雪晶碰冻

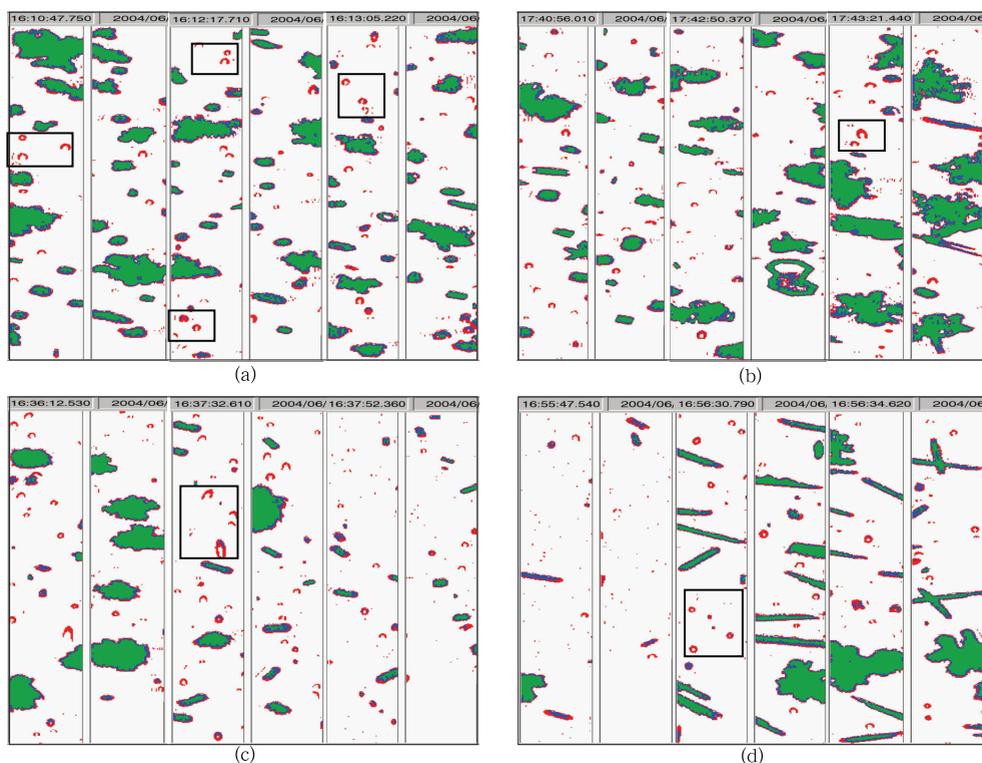


图8 平飞段1~4中2D-GA2所测粒子二维图像

a. 平飞段1, b. 平飞段2, c. 平飞段3, d. 平飞段4 图中方框所圈粒子可能为液滴

过冷水滴形成。平飞段 2 整个时间段中, 粒子主要包括淞附的雪团和雪晶、霰粒及少量柱状、针状冰晶和片状雪晶。平飞段 3 主要为柱状冰晶及淞附的霰粒, 此外不可分辨形状的细小粒子也明显增多, 其中淞附的霰粒主要集中在 16 时 37 分 37 秒之前的时间段, 之后则多为冰晶及细小粒子, 这与图 7c 中 2D-GA2 所测粒子浓度及直径变化相一致的。平飞段 4 主要由大量针状冰晶及细小粒子组成, 还包括少量淞附的冰雪晶, 其中 16

时 56 分 26 秒之前的时间段中主要为细小粒子, 之后开始出现较多的针状冰晶和淞附的冰雪晶, 图像的特征与图 7d 中 2D-GA2 的浓度及直径变化也是相一致的。

根据表 3 及图 7, 平飞的 1、2 段中 FSSP-100 所测粒子浓度小, 平均直径大, 峰值直径大于  $20\sim 30\mu\text{m}$ ; 平飞的 3、4 段中 FSSP-100 所测粒子浓度大, 平均直径小, 峰值直径在  $10\sim 20\mu\text{m}$  之间。根据上述特征, 可推断前者主要由小冰晶组成, 后者则主要为云滴, 也

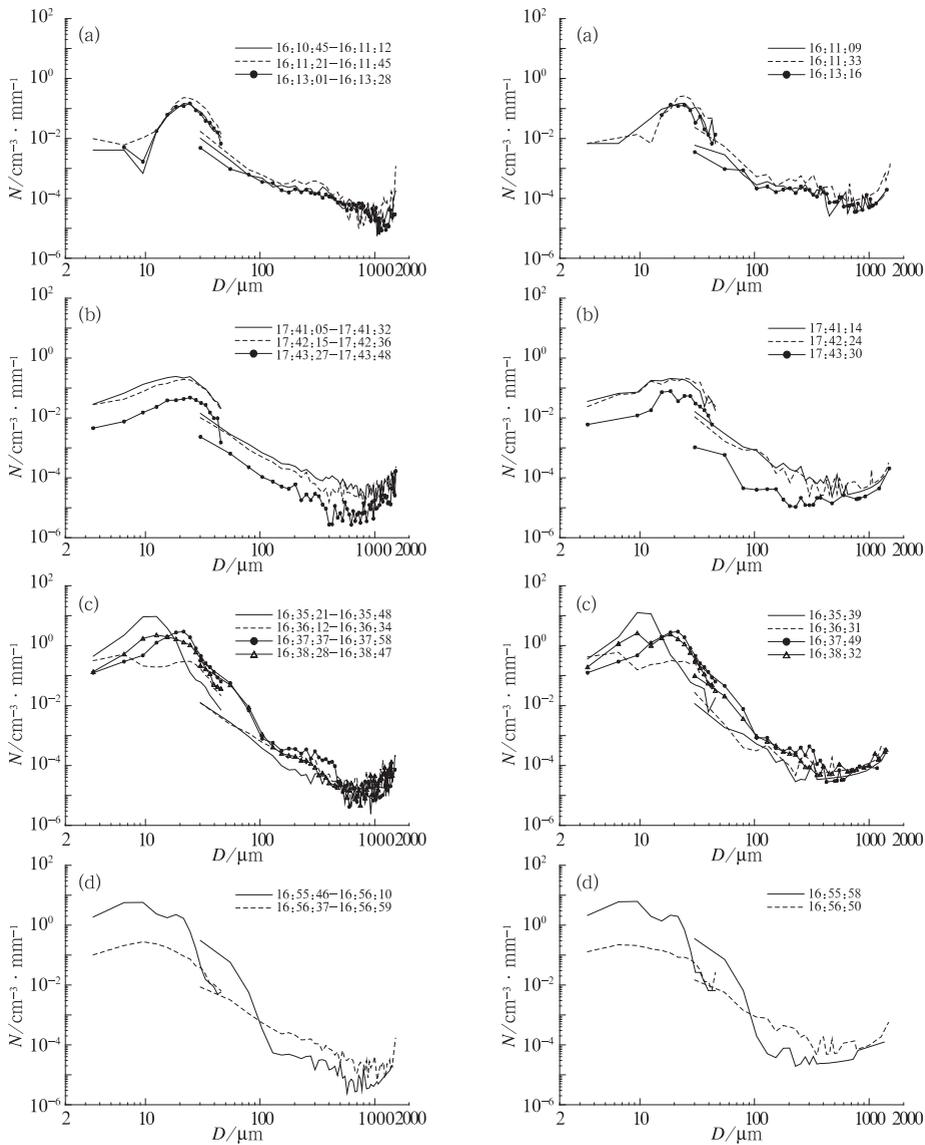


图 9 平飞段 1~4 中 2D-GA2 和 FSSP-100 所测粒子的平均谱型(左列)及瞬时谱型(右列)

即后者的有较多的过冷液水,但这与图 8 中粒子图像的淞附情况不一致。在图 5、8 的粒子图像中,均可观测到相当数量的挡光度在 25%至 50%之间的圆形或弧形粒子(参见图 8 中方框所示粒子),这些粒子可能为液态水滴。FSSP-100 观测只能观测到最大直径  $47\mu\text{m}$  的粒子,2D-GA2 可观测更大的范围,而且较大的液滴与冰晶的之间的碰并效率要大于小云滴,这可能是造成上述不一致现象的原因之一。原因之二则可能是由于云层中粒子存在水平及垂直方向的交换,在交换过程中如果粒子经过过冷水含量高的区域,碰冻淞附的过程会增强,平飞段 1、2 中观测到的大量具有较强淞附的粒子,可能有一部分是由此原因造成的;平飞段 3、4 中的柱状、针状冰晶形状清晰,而且小冰晶与小云滴的效率也低于大的冰雪晶粒子,因此此段的冰晶可能主要通过凝华过程成长而非碰并淞附过程。上述原因只是基于本次探测数据分析而言,其深层原因仍需更多观测资料并结合其他类型资料(如雷达资料)来深入分析。

图 9 为前述各平飞段中 FSSP-100 和 2D-GA2 所测云粒子的平均谱和瞬时谱。平均谱反映了相应时间段内云粒子模态的总体状况;瞬时谱型则反映了云层中水平方向不同位置的粒子模态的变化状况。从两种谱型上均可看到,两探头的谱分布具有很好连续性,谱型宽,尤其是平均谱型完全涵盖了两个探头的所有测量通道。两种谱型从整体来看均呈单峰或双峰状态,大于  $100\mu\text{m}$  的粒子段谱线起伏变化剧烈,明显区别于暖云中的谱线变化(图 6), $1000\mu\text{m}$  以上,谱型曲线有明显上升趋势,这说明云中有冰雪晶有较强增长,许多已达较大尺度,二维图像中观测到较多的淞附雪晶及由攀附作用形成的雪团粒子也说明了这一点,由此可判断,冷云中许多区域过冷液水含量较大,利于冰雪晶粒子通过碰冻、攀附等过程而成长。

由图 9a、图 9b 平均谱可看到,FSSP-100 所测谱段的最大峰值全部在  $20\sim 30\mu\text{m}$  之间

(瞬时谱的峰值有的甚至出现在 30 以上),谱峰向大粒子端平移,图 7c、d 中相应谱型也有一部分与此特征类似,这也与垂直观测中表现的特征类似(图 6),由于小云粒子(云滴、冰晶)主要通过凝结、凝华作用增长,图中的谱型说明在这些高度层上特别是 6000m 以上云层内水汽条件较好,凝结、凝华作用较强,粒子长大到一定尺度会通过碰并过冷水而继续增长,但由于云中过冷水含量的不同,因此在不同高度或同一高度的不同部位,粒子长大的尺度也不同。

#### 4 结论

本文对 2004 年 6 月 12 日的层状云飞机探测结果进行了分析,利用 FSSP-100 和 2D-GA2 探头所测微物理数据详细分析了云中垂直和水平微物理特征,结果总结如下:

(1) 此次云系主要分为两层,上层为高积云,云底高度主要在 5800m 以上,位于  $0^{\circ}\text{C}$  层(4940m)以上,云厚在 500m 以上,为纯冷云;下层为深厚的纯暖性层积云,云底云顶高度分别为 2660m 和 4458m。两层云之间为若干薄的云层,其厚度均不超过 100m,主要为  $0^{\circ}\text{C}$  层以上的纯冷云。Ac 云和 Sc 云之间存在干层,其中虽可观测到较大尺度的冰相粒子,但由于干层厚度合计可达 1000m 以上,对降水形成不利,这是本次降水较弱的重要原因之一。

(2) 云中微物理量的垂直和水平分布特征具有明显的不均匀性,主要表现在云粒子浓度、尺度、云中含水量、水汽分布等的不均匀变化上。垂直方向上高积云的不均匀性较下层纯暖性层积云更为明显。 $0^{\circ}\text{C}$  层以上的云层中存在较多的过冷水,冰相粒子的淞附、粘连现象比较普遍,尺度较大的冰雪晶粒子在下落过程中主要通过碰冻、攀附作用增长。冷云中小粒子(云滴、小冰晶)主要通过凝结、凝华作用成长,特别是 6000m 以上,水汽条件较好,凝结、凝华作用较强。6000m 以上

的冷云中存在冰晶粒子的高浓度区,大量小冰晶的成长争食水汽,造成云中一定区域蒸发强烈,过冷水较少,不利于大的冰相粒子的产生和增长。

(3) 本次降水雨滴主要由纯暖性 Sc 云中的暖云成雨过程形成,冷云过程只在 Sc 云顶附近有一定作用,不占主导地位。因此,本次降水主要机制为暖性层状云中的暖云过程,所以其降水量不大,这也是造成本次降水较弱的重要原因。

### 参考文献

- [1] 王扬锋,雷恒池,樊鹏,等. 一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 388-395.
- [2] 李仑格,德力格尔. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 192-196.
- [3] 王广河,游来光. 乌鲁木齐冬季冷锋云带和锋下层积云的降水微物理结构特征及其降雪特征[J]. 气象, 1989, 15(3): 15-19.
- [4] 苏正军,王广河,刘卫国,等. 青海省春季降水云的微物理特征分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 36-40.
- [5] 苏正军,刘卫国,王广河,等. 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.
- [6] 陈小敏,刘奇俊,章建成. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究[J]. 气象, 2007, 33(7): 33-43.
- [7] 刘卫国,刘奇俊. 祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究(I):模式云物理方案和地形云结构[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 16-29.
- [8] 李照荣,李荣庆,李宝梓. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 583-589.
- [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] 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): 14-22.
- [11] 张佃国,郭学良,付丹红,等. 2003 年 8—9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 596-610.
- [12] 游景炎,段英,游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件[M]. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京:气象出版社, 1994: 236-249.
- [13] 游来光,马陪民,胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究[J]. 气象科技, 2002, 30(增刊): 19-56.
- [14] 王鹏飞,李子华. 微观云物理学[M]. 北京:气象出版社, 1989: 395-400.