

2003年8~9月北京及周边地区云系 微物理飞机探测研究

张佃国^{1, 3} 郭学良¹ 付丹红¹ 李宏宇²

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 北京人工影响天气办公室, 北京 100089

3 山东省人工影响天气办公室, 济南 250031

摘 要 对2003年8~9月北京及周边地区4次飞机探测结果, 特别对资料较完整的8月15日的层积云(Sc)和9月4日的层状云(St)系进行了较详细的分析。结果表明, FSSP-100测量的小云粒子(云滴、冰晶)最大浓度的变化范围从Sc云的 120 cm^{-3} 到深厚高层云(As)的 183 cm^{-3} , 平均直径 $7.22\sim 16.05\text{ }\mu\text{m}$ 。2D-GA2探头观测的冰粒子最大浓度变化范围从 $2.25\times 10^{-3}\text{ cm}^{-3}$ 到 $3.29\times 10^{-1}\text{ cm}^{-3}$ 。机载King热线液态水含量仪(King-LWC)的最大含水量变化范围为 $0.42\sim 0.69\text{ g/m}^3$ 。St云垂直和水平分布不均匀特性很明显, 高空(-10°C 层以上)有较大的小云粒子浓度, 达到 120 cm^{-3} 以上, 尺度也比较大, 最大值为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。云中液态水含量随高度缓慢减小, 基本处于 $0.1\sim 0.2\text{ g/m}^3$ 的范围。在 $-5.9\sim -8^\circ\text{C}$ 层, 主要是柱状冰晶和少量结凇体, $-8\sim -12^\circ\text{C}$ 层显示基本为结凇粒子, -20°C 层左右表现出较多的枝状冰粒子。大冰粒子浓度基本在 $0.01\sim 1\text{ L}^{-1}$ 左右。Sc云和St云的平均谱存在明显的差异。Sc云系的大粒子不同层的平均谱很相似, 为单峰分布, 谱宽达到 $1500\text{ }\mu\text{m}$ 。越到云低层, 云粒子浓度越低。St云系的大粒子不同层的谱分布差异比较大, 云中在 $0\sim -8^\circ\text{C}$ 和 $-8\sim -12^\circ\text{C}$ 层, 直径小于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子谱型基本相似, 大于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的大粒子谱分布差异较大, $-8\sim -12^\circ\text{C}$ 层有明显的双峰分布特征, 而 $0\sim -8^\circ\text{C}$ 呈现多峰特征, 谱宽达到 $1300\sim 1400\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词 云微物理特征 飞机探测 谱分布

文章编号 1006-9895(2007)04-0596-15

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

Aircraft Observation on Cloud Microphysics in Beijing and Its Surrounding Regions during August-September 2003

ZHANG Dian-Guo^{1, 3}, GUO Xue-Liang¹, FU Dan-Hong¹, and LI Hong-Yu²

1 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

3 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

Abstract The cloud microphysical data sampled with probes of Particles Measuring System (PMS) in four aircraft flights during August and September in 2003 in the Beijing and surrounding regions are analyzed, in particular, the more detailed analyses have been done for stratocumulus clouds on 15 August and stratiform clouds on 4 September. The results show that the maximum number concentration of small particles sampled with FSSP-100 probe changes

收稿日期 2006-03-10, 2006-09-21 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40333033, 中国科学院知识创新重要方向项目 KZCX3-SW-225, 国家自然科学基金资助项目 40575003, 国家科技支撑计划课题 2006BAC12B03

作者简介 张佃国, 男, 1977年出生, 硕士, 研究方向: 云降水物理与人工影响天气。E-mail: zdg131415@sohu.com

from 120 cm^{-3} for Sc clouds to 183 cm^{-3} for deep As clouds. The mean diameter is around $7.22 - 16.05 \mu\text{m}$. The data of 2D-GA2 probe show that the maximum number concentration of large particles changes from $2.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ to $3.29 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$. The maximum water content explored with King-LWC probe is $0.42 - 0.69 \text{ g/m}^3$ in Sc clouds. Both vertical and horizontal distributions in stratiform clouds show obviously inhomogeneous features, more than 120 cm^{-1} high number concentration of small particles exists at upper levels (above -10°C level) with also larger sizes, the maximum size reaches $20 \mu\text{m}$. The liquid water content decreases slightly with height and also keeps around $0.1 - 0.2 \text{ g/m}^3$. The layers between $-5.9 - -8^\circ\text{C}$ are composed of a large number of column ice crystals and small number of riming particles, and those between $-8 - -12^\circ\text{C}$ are almost rimed particles, and those above -20°C were primarily dendritic ice particles. The number concentration of large-size ice particles is around $0.01 - 1 \text{ L}^{-1}$. The layer-averaged size distributions of cloud particles are quite different in Sc and St clouds. The large particles follow unimodal distribution in Sc, and the width of spectrum reaches about $1500 \mu\text{m}$. The low number concentration corresponds to the low layer of cloud. But layer-averaged size distributions in As cloud are quite different, for particles less than $400 \mu\text{m}$ in diameter, the size distributions averaged for the layers of $0 - -8^\circ\text{C}$ and $-8 - -12^\circ\text{C}$ are almost the same, while for particles larger than $400 \mu\text{m}$ in diameter, the size distribution averaged for layers $-8 - -12^\circ\text{C}$ has an obvious bimodal type, and that for layers $0 - -8^\circ\text{C}$ has a multi-modal type. The width of spectrum is around $1300 - 1400 \mu\text{m}$.

Key words cloud microphysical property, aircraft observation, size distribution

1 引言

云在辐射平衡、气候环境、降水预报及人工影响天气中均具有重要的作用。由于云形成和演变的复杂性及目前缺乏精确稳定的测量系统, 获得云中粒子分布特征比较困难, 是目前阻碍数值模式中云精确参数化、云间接气候效应和降水预报研究的重要因素之一。

20 世纪 70 年代开始, 机载粒子测量系统 PMS (Particle Measuring System) 开始在国际上的一些观测试验中使用, Hobbs 等^[1]对美国温带气旋云系和地形云进行了探测试验。Houze 等^[2]给出了温带气旋计划中锋面云中降水粒子尺度谱分布。Lo 等^[3]研究了美国冬季风暴中降水粒子尺度谱分布。Gorden 等^[4]报道了加利福尼亚雨带降水粒子尺度谱分布, 而 Grabowski 等^[5]对苏联冬季层状云的探测和人工影响试验等进行了研究, 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的作用。

20 世纪 80 年代初期以来, 在我国的一些观测试验中也开始使用 PMS 系统, 如在 1982 年 6 月 8 日 08~09 时 (北京时, 下同) 西安市观测试验中^[6], PMS 探测发现晴空气溶胶粒子浓度最大值

为 38 cm^{-3} , 最小值为 4 cm^{-3} , 粒子浓度最大值出现在逆温层下, 即 $700 \sim 1000 \text{ m}$ 高层。利用 PMS 对四川、新疆层状云也进行了探测研究^[7~9]。樊曙光^[10]对 1994 年 6 月 28 日的一次降水云系 PMS 探测资料进行分析后认为, 液态含水量 (LWC) 最大值出现在 -5°C 层附近。张连云等^[11]和苏正军等^[12]分别分析了山东省和青海省层状云的云及降水的微物理特征。由此可见, 云的结构和云粒子分布特征与云型、云产生地域、天气系统、背景及发展阶段等密切相关。

北京地处华北平原北端, 其降水系统受周围地形、大 (中) 尺度天气系统的影响很大, 经常形成中尺度对流系统和灾害性对流天气^[13, 14], 在秋季会出现大范围的层 (积) 云降水, 是实施飞机人工增雨的主要对象。为了解一个云系物理结构, 本文利用北京地区 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。目的在于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。

2 研究方法

2.1 PMS 观测仪器

2003 年 8~9 月北京观测试验使用的 PMS 是中国气象科学研究院从美国 PMS 公司引进的机载

粒子测量系统。该系统安装在夏衍 III 飞机两侧的机翼下部, 由计算机控制数据采集、存储和处理。可探测大气中直径从 $0.1 \sim 6200 \mu\text{m}$ 的气溶胶、云粒子和降水粒子。PMS 粒子探测仪器共有四个探头, 即气溶胶粒子探头 PCASP-100X, 测量范围为 $0.1 \sim 3 \mu\text{m}$; 前向散射粒子谱探头 FSSP-100, 探测范围为 $0.5 \sim 47 \mu\text{m}$; 前向散射粒子谱量程扩展探头 FSSP-100-ER, 探测范围为 $1 \sim 95 \mu\text{m}$; 二维灰度云粒子探头 OAP-2D-GA2, 测量范围为 $25 \sim 1550 \mu\text{m}$; 二维灰度降水粒子探头 OAP-2D-GB2, 测量范围为 $100 \sim 6200 \mu\text{m}$ 。FSSP-100 用于测量云粒子谱, OAP-2D-GA2 和 OAP-2D-GB2 分别用于测量云粒子和降水粒子谱及二维图像。另外, 还装载有 GPS, King-LWC 热线含水量仪、温度计等观测设备。此次观测试验中 OAP-2D-GB2 探头出现问题, 本文没有包括这个探头的结果。

2.2 资料处理

本文分析了北京地区 2003 年 8~9 月共 4 架次的 PMS 飞机探测结果。其中对观测期间探测设备出现故障或数据样品较小的资料不进行分析。按照如下方法对观测的云粒子进行统计^[15~17]计算:

$$\text{平均直径: } D_1 = \sum [D_i \times N(D_i)] / N,$$

$$\text{数浓度: } N(D_i) = n(D_i) / (V \times \Delta D),$$

$$\text{总浓度: } N = \sum [n(D_i) / V],$$

$$\text{含水量: } C_{\text{lw}} = \frac{\pi}{6} \rho \times 10^{-12} \sum (D_i^3 N(D_i) \Delta D),$$

$$\text{取样体积: } V = S_E \times T_{\text{AS}} \times T,$$

其中, D_i 为 i 等级云粒子的中值直径 (单位: μm); $N(D_i)$ 为单位体积内 i 等级云粒子的数浓度 (单位: $\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$); N 为单位体积内云粒子总数 (单位: cm^{-3}); V 为有效取样体积 (单位: cm^3); $n(D_i)$ 为 1 帧内 i 等级云粒子的个数; T_{AS} 为飞机的真空速

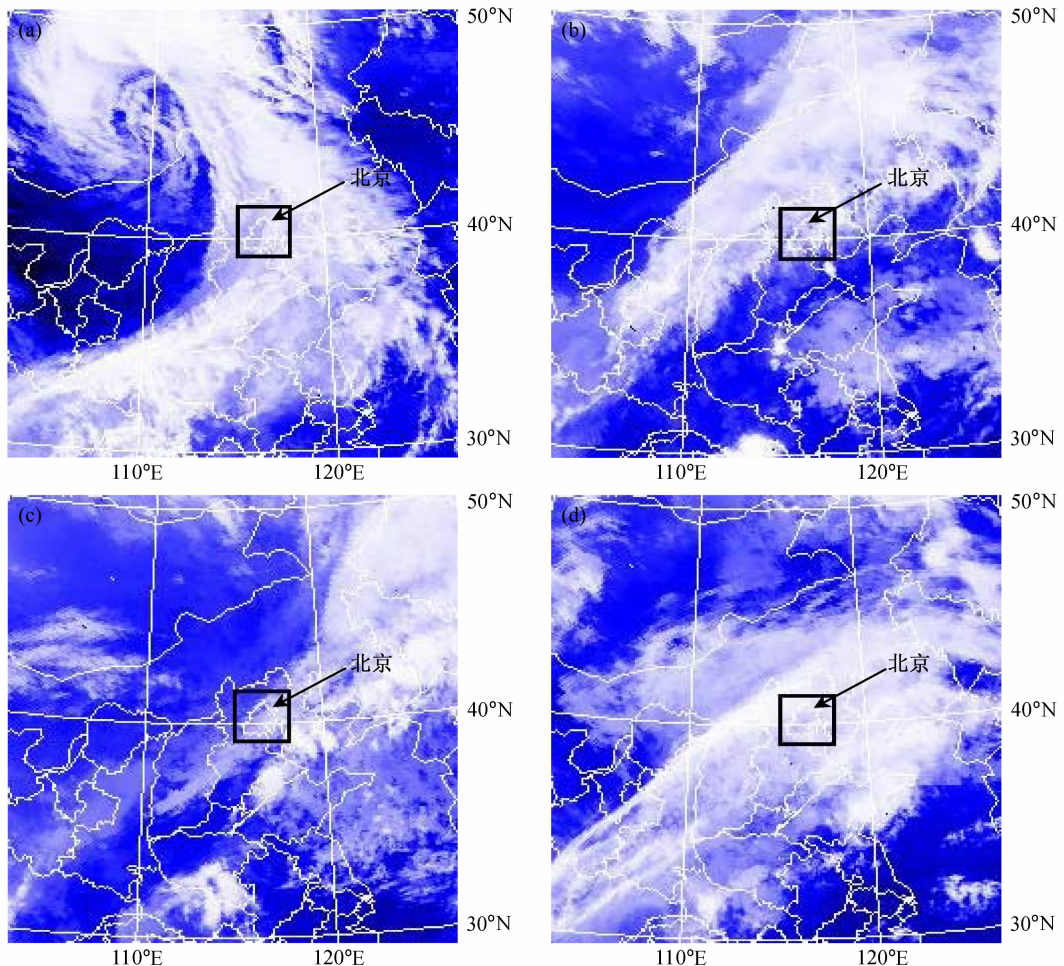


图1 GOES 卫星云图: (a) 8月15日13:25; (b) 8月21日20:01; (c) 8月22日07:25; (d) 9月4日09:25

Fig. 1 GOES satellite cloud images; (a) 1325 LST 15 Aug; (b) 2001 LST 21 Aug; (c) 0725 LST 22 Aug; (d) 0925 LST 4 Sep

(单位: cm/s); S_E 为仪器的有效取样面积 (单位: cm^2); T 为每帧谱数据的取样时间 (单位: s); C_{lw} 为液态水含量 (单位: g/cm^3)。

3 结果分析

3.1 探测状况及云系特征

图 1 给出了 GOES 卫星云图, 可以看到, 飞机只在云系的某一部位进行了观测。本文主要分析 8 月 15 日冷锋层积云系 (图 1a) 和 9 月 4 日的暖锋层状云系的飞机探测结果。8 月 15 日是一次典型的北方冷锋云系, 云团从西部向东南移动, 此次探测基本都在云团内进行。9 月 4 日的暖锋云系气团是从西南和南部向北移动。整个探测过程也在云层中进行。

表 1 给出了 2003 年 8~9 月飞行探测情况及云系的特征。探测期间的云系基本为层状或层积云。除 9 月 4 日上午的云系外, 其他云系的 0°C 层一般在 4000 m 以上。探测一般在近地面开始一直到云

的中上部, 但由于飞机完成垂直爬升探测过程需要较大的水平飞行距离, 因此从机场起飞后在云低层获得的探测资料和高空的探测资料并不在垂直线上。对层状云来说, 由于云水平分布相对均匀, 垂直探测资料的代表性更好一些。从表 1 中给出的水平探测范围可以看到, 此次探测基本集中在北京及周边的河北地区上空的云系。

3.2 探测云系的微观统计特征

表 2 给出 2003 年 8~9 月 PCASP、FSSP-100 和 2D-GA2 三探头及 King-LWC 所测的不同云系的粒子浓度、尺度和云液态含量特征。表 2 中包括了粒子最大浓度、平均浓度、最大直径、平均直径及液态水含量的最大和平均量。可以看出, FSSP-100 测量的小云粒子 (云滴或冰晶) 最大浓度的变化范围从层积云的 120 cm^{-3} (8 月 21 日) 到深厚高层云的 183 cm^{-3} (9 月 4 日)。平均直径一般在 $7.22\sim16.056\text{ }\mu\text{m}$, 最大直径的粒子出现在层积云观测中。平均浓度和直径的变化范围分别为 $36.5\sim$

表 1 2003 年 8~9 月期间探测云系的特征
Table 1 Characteristics of the observed cloud system during Aug – Sep 2003

日期	时间	高度/m	温度/ $^\circ\text{C}$	0°C 层高度/m	探测范围
8 月 15 日	13:31:01~16:00:22	22~5394	31.9~−8.2	4500	昌平、怀来、丰宁
8 月 21 日	20:37:44~21:40:42	197~7198	31.7~−10.2	4900	怀来、宣化、张家口、张北
8 月 22 日	06:48:19~08:50:25	59~7190	34.2~−10.7	5300	密云、兴隆、蔚县、宝邸
9 月 24 日	09:17:25~12:28:59	24~7793	18.6~−22.4	3400	怀来、赤诚、怀来

表 2 2003 年 8~9 月 PCASP、FSSP-100、2D-GA2 及 King 热线含水量仪所测的粒子特征

Table 2 Statistical properties of cloud particles sampled with probes of PCASP, FSSP-100, 2D-GA2 and King LWC during Aug – Sep 2003

云型	日期	探头	$N_{e,max}/\text{cm}^{-3}$	$\bar{N}_e/\text{cm}^{-3}$	$D_{e,max}/\mu\text{m}$	$\bar{D}_e/\mu\text{m}$	$C_{LW,max}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\bar{C}_{LW}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Sc	8 月 15 日	FSSP-100	1.44×10^2	5.40×10^1	42	16.056	0.691	0.228
		2D-GA2	3.29×10^{-1}	7.33×10^{-2}	1300.00	190.736		
		PCASP-100X	4.10×10^3	2.42×10^2	2.75	1.02		
Sc	8 月 21 日	FSSP-100	1.20×10^2	3.65×10^1	35	10.54	0.652	0.089
		2D-GA2	2.25×10^{-3}	2.70×10^{-4}	1000.00	156.27		
		PCASP-100X	5.14×10^3	3.76×10^2	2.75	0.32		
Sc	8 月 22 日	FSSP-100	1.34×10^2	4.10×10^1	31.5	8.29	0.423	0.095
		2D-GA2	1.38×10^{-2}	2.45×10^{-3}	79.50	41.55		
		PCASP-100X	6.62×10^3	1.59×10^2	2.75	0.56		
As	9 月 4 日	FSSP-100	1.83×10^2	6.33×10^1	30.50	7.22	0.686	0.131
		2D-GA2	4.47×10^{-3}	3.20×10^{-4}	1325.00	236.92		
		PCASP-100X	4.10×10^3	2.79×10^1	2.75	1.34		
		FSSP-100-ER	8.30×10^{-1}	1.80×10^{-1}	74.00	24.40		

注: $N_{e,max}$, $\bar{N}_e$, 分别为最大和平均的云粒子浓度, $D_{e,max}$, $\bar{D}_e$ 分别为最大和平均的云粒子直径, $C_{LW,max}$, $\bar{C}_{LW}$ 分别为最大和平均云液态水含量。

63.3 cm⁻³和 7.22~16.056 μm。平均粒子浓度比最大粒子浓度小一个量级。2D-GA2 探头可测量尺度在 25~1550 μm 范围的大云滴、雨滴、冰雪晶结淞和聚合体和霰粒子等。从表 2 的结果看, GA2 探头观测的最大粒子浓度变化范围从 2.25×10⁻³ cm⁻³ 到 3.29×10⁻¹ cm⁻³。8 月 15 日的层积云中大粒子浓度达 329 L⁻¹, 其他层积云不到 5 L⁻¹。层积云和高层云中的最大粒子直径在 79.50~1325 μm 左右, 平均直径一般在 41.55~236.92 μm。平均粒子浓度比最大粒子浓度小一个量级。King-LWC 所测液态水含量的变化范围为 0.423~0.691 g/m³, 平均液态水含量的变化范围为 0.095~0.228 g/m³。

3.3 观测分析结果比较

表 3 给出 1989~2003 年期间, 中国北方层状云和层积云的飞机探测比较情况。综合分析这些观测发现, 液态含水量、粒子尺度的变化趋势不明显, 山东和北京地区粒子浓度观测值普遍较小。冰晶数浓度在 21 世纪初在兰州观测值较大, 最大值可达 339.50 L⁻¹, 在同一地区的 Sc 的冰晶粒子浓度比 St 的冰晶粒子浓度大。在粒子尺度方面, 同一地区 Sc 的平均粒子尺度比 St 的平均粒子尺度大。最大粒子尺度是在 2003 年北京地区观测的最大, 可达 1325 μm。国外对层状云的观测实验^[22], 对冰晶粒子浓度和过冷水含量的观测也使用了 PMS。Hobbs 等^[22]在 1981 年夏天所观测的最大冰晶粒子浓度为 75 L⁻¹, 利用 Johnson-Williams 液态水含量探头 (J-W) 所测最大液态水含量为 1.0 g/m³; 在 1983 年秋天所观测的最大冰粒子浓度为 12 L⁻¹, 利用 J-W 所测最大液态水含量为 1.3 g/m³。本文探测的结果与国内外的一些飞机观测结果在数值上是相当的。

3.4 云微物理量时空分布和谱特征

下面, 我们对观测数据较完整的 2 次探测过程进行云观测量的时空分布特征分析, 结合二维图像资料分析各种云粒子的分布状况及谱特征。

3.4.1 Sc 云系探测

2003 年 8 月 15 日的云系是比较典型的由冷锋面形成的层积云系。根据雷达回波显示, 回波呈带状, 回波区大部分强度在 10~25 dBZ 范围。云系前方出现 50 dBZ 以上的强对流中心。对这次云系的飞机探测按飞行路线可分为上升、平飞和下降 3 个阶段, 历时 2 小时 28 分。

这里只对飞机爬升时段观测的有关量进行分析。图 2 给出了 8 月 15 日 FSSP-100、King-LWC 及 2D-GA2 探头观测量随高度的分布, 为便于分析各高度上的粒子相态、种类, 图 2 给出了该次观测 2D-GA2 在一些高度上获取的图像资料。从图 2a 的粒子浓度随高度分布可以判断, 云底大约在 3000 m, 0℃层所在的高度为 4500 m, FSSP-100 探头在 0℃层以下探测到的是云滴粒子, 而 0℃层以上是冰晶和液滴共存体的分布情况。云滴浓度从云底开始随高度迅速增加一直到 3500 m, 最大浓度达到 60 cm⁻³左右。随后基本保持不变一直到 0℃层附近有较大的增加, 达到 80 cm⁻³。从尺度分布看 (图 2b), 从云底到 0℃层附近云滴直径在 10~45 μm 范围的都有, 云底附近出现的云滴直径最大。而 0℃层以上的粒子直径基本在 10 μm 左右。由于探测飞行只进行到约 5400 m 的高度, 无法得到在此高度以上的粒子分布状况。另外, 1.5 km 以下出现的直径在 20 μm 左右的小云滴可能是地面有降水造成的, 其浓度最大值为 38 cm⁻³, 最小为 18 cm⁻³, 平均值为 25 cm⁻³ 左右。King-LWC 所

表 3 1989~2003 期间飞机 PMS 探测的北方层状云物理特征比较

Table 3 Comparisons of stratiform cloud properties derived from airborne PMS data during 1989 - 2003 in North China

日期	地区	云型	$\bar{N}/L^{-1}$	$\bar{N}_{max}/L^{-1}$	$\bar{D}/\mu m$	$D_{max}/\mu m$	$\bar{C}_{LW}/g \cdot m^{-3}$	$\bar{C}_{LW_{max}}/g \cdot m^{-3}$
2001 年 9~10 月	兰州 ^[15]	St	36.34	339.5	103	/	0.001	0.014
2001 年 10 月	甘肃 ^[18]	St	1.60	10.71	127.11	211.5	/	/
1989~1992 年 7~9 月	山东 ^[11]	St	13.9	52.6	59.3	305	0.057	0.036
2003 年 9 月	北京	St	0.366	3.78	195.50	1325	0.117	0.193
1989 年 10 月	山东 ^[19]	Sc	0.89	3.335	/	/	0.025	0.148
2003 年 7 月	吉林 ^[20]	Sc	/	1.062	/	/	3.3	1.166
1992 年 6 月	河北 ^[21]	Sc	/	9.65	274.62	/	0.187	/
2003 年 8 月	北京	Sc	0.358	1.525	243.13	579.5	0.213	0.393

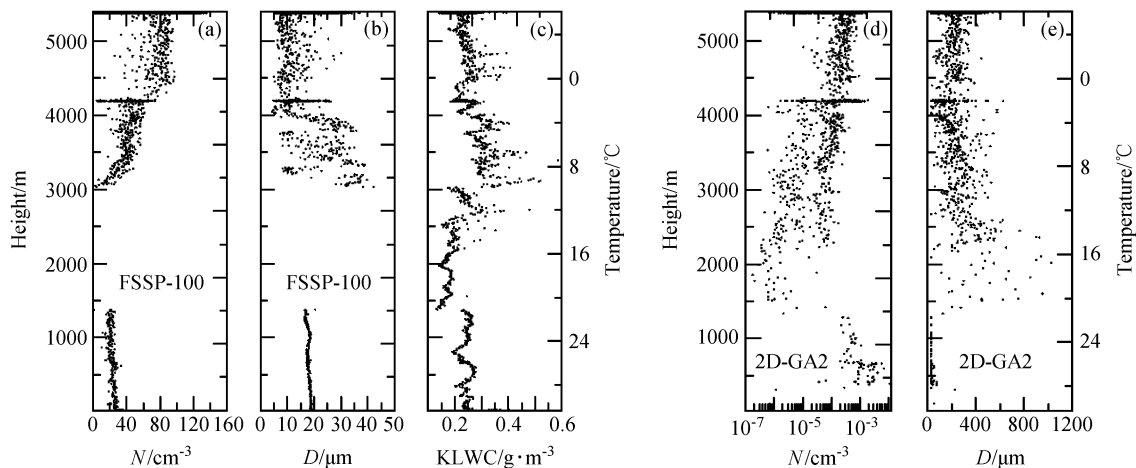


图 2 2003 年 8 月 15 日飞机上升过程探测粒子特征量随高度/温度的分布: (a) FSSP-100 粒子浓度; (b) FSSP-100 粒子直径; (c) King 含水量 (KLWC); (d) 2D-GA2 浓度; (e) 2D-GA2 直径。横线表示飞机进行了水平飞行探测

Fig. 2 Vertical distributions of cloud microphysical values on 15 Aug 2003: (a) The number concentration of cloud particles sampled with FSSP-100 probe; (b) diameter of cloud particles with FSSP-100 probe; (c) King liquid water content (KLWC); (d) the number concentration of cloud particles sampled with 2D-GA2 probe; (e) diameter of cloud particles sampled with 2D-GA2 probe. The black horizontal lines indicate the aircraft made the horizontal detection at these levels

测的液态水含量随高度出现多个峰值(图 2c)。接近云底的上部暖云区有一较大液态水区, 含量达到 0.5 g/m^3 以上。液态水垂直分布尽管表现出不均匀特性, 但从云底开始随高度增加, 液态水含量总体是减小的, 到 0°C 层下部减小到 0.2 g/m^3 左右。但在 0°C 层以上的一 $2\sim-3^\circ\text{C}$ 区有高达 0.4 g/m^3 的过冷水含量层出现。

2D-GA2 探头所测的粒子浓度在 0°C 层以上的分布较为单一, 而在 0°C 层以下的分布比较复杂(图 2d)。粒子浓度最小值和最大值相差比较大, 可达 $3\sim5$ 个量级, 说明云粒子的垂直和水平分布很不均匀。2D-GA2 探头所测粒子直径最小值为 $17.75 \mu\text{m}$, 最大值可达 $1100 \mu\text{m}$ (图 2e)。从图 3 显示的 2D-GA2 图像可以看到, 云底(对应温度 10°C , 高度为 3000 m) 以下基本为雨滴粒子(图 3a、b)。云底以上从 3000 m 到 4500 m 的 0°C 层是处于部分融化状态的冰雪粒子(图 3c、d)。 $4500\sim5380 \text{ m}$ 是冰雪晶的结淞体、雪团, 对应温度为 $0\sim-5.8^\circ\text{C}$ (图 3e)。雪团是枝状冰雪晶通过淞附过冷水产生的, King LWC 也显示在 0°C 层上部存在较大的过冷水含量区。 5380 m 以上, 温度变得更低, 枝状冰雪晶或聚合物变得较明显(图 3f)。从 2D-GA2 的分析可以得到, 此次降水的雨滴主要是冰粒子融化形成的, 冷云过程占主导地位, 暖云过程

不明显, 云中几乎没有观测到大的雨滴粒子, 雨滴一般出现在云下。

图 4 给出了 8 月 15 日 2D-GA2 探头测量的不同高度的粒子谱分布。 2310 m 层表示云下的雨滴谱, 呈单峰分布, 峰值出现在 $80 \mu\text{m}$ 处, 谱宽较窄, 最大直径尺度为 $480 \mu\text{m}$ 。雨滴粒子浓度的量级为 $10^{-4}\sim10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。 2898 m 层表示云中接近云底处基本处于完全融化状态的粒子谱, 呈双峰结构, 峰值分别出现在 $80 \mu\text{m}$ 和 $420 \mu\text{m}$ 处, 谱宽为 $550 \mu\text{m}$ 。浓度量级为 $10^{-3}\sim10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。 3529 m 层表示云中半融化状态的雪团谱, 是单峰结构, 峰值在 $100 \mu\text{m}$ 处, 谱宽为 $600 \mu\text{m}$ 。浓度的量级为 $10^{-4}\sim10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。 3757 m 层表示边缘融化雪团谱, 是单峰结构, 谱宽最窄, 只有 $260 \mu\text{m}$, 峰值出现在 $140 \mu\text{m}$ 处。粒子浓度的量级为 $10^{-2}\sim10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。 5384 m 对应温度 -5.8°C 层表示冰雪晶的结淞粒子谱, 呈多峰结构, 谱宽可达 $730 \mu\text{m}$, 峰值分别为 $40 \mu\text{m}$ 、 $110 \mu\text{m}$ 、 $220 \mu\text{m}$ 和 $350 \mu\text{m}$ 。粒子浓度的量级为 $10^{-1}\sim10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。 5384 m 对应 -6.3°C 层表示云上部的枝状冰雪晶或聚合物, 呈多峰结构, 峰值分别出现在 $40 \mu\text{m}$ 、 $280 \mu\text{m}$ 、 $440 \mu\text{m}$ 和 $590 \mu\text{m}$ 处, 谱宽可达 $730 \mu\text{m}$ 。粒子浓度的量级为 $10^{-2}\sim10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

从以上分析可以看到, Sc 云下基本为雨滴, 雨

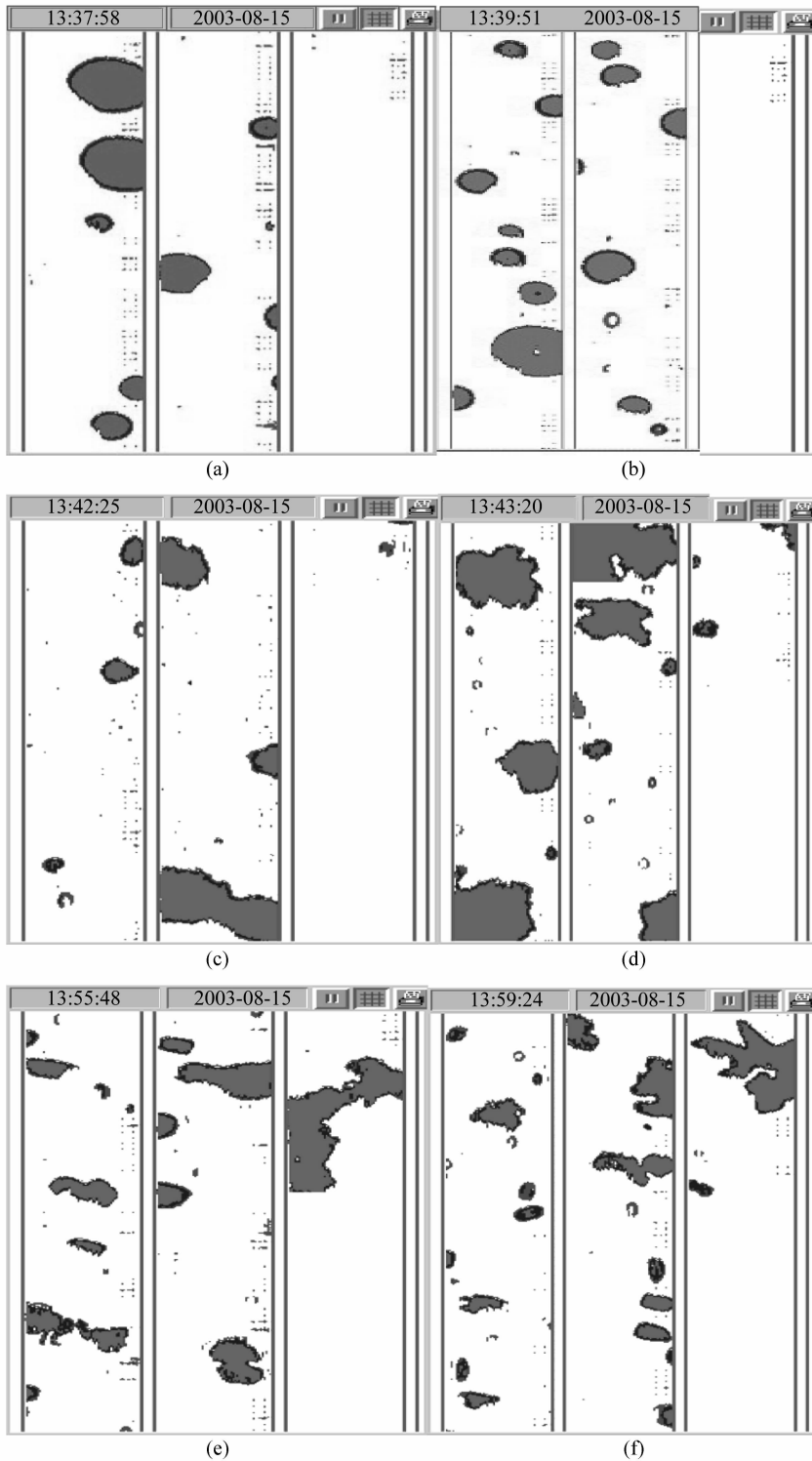


图3 2003年8月15日飞机利用2D-GA2垂直探测的二维粒子图像:(a)雨滴粒子,对应高度为2310 m,温度为13.6°C;(b)雨滴粒子,对应高度为2898 m,温度为10.1°C;(c)半融化状态的冰雪粒子,对应高度为3529 m,温度为6.1°C;(d)边缘融化的雪团,对应高度为3757 m,温度为4.6°C;(e)冰晶聚集体,对应高度为5380 m,温度为-5.8°C;(f)枝状冰晶,对应高度为5384 m,温度为-6.3°C

Fig. 3 Two-dimensional particle images with probe 2D-GA2 on 15 Aug 2003: (a) Raindrops at the height of 2310 m and temperature of 13.6°C; (b) raindrops at the height of 2898 m and temperature of 10.1°C; (c) the semi-melted snow particles at the height of 3529 m and temperature of 6.1°C; (d) the edge-melted snow particles at the height of 3757 m and temperature of 4.6°C; (e) the ice aggregates at the height of 5380 m and temperature of -5.8°C; (f) the dendritic crystals at the height of 5384 m and temperature of -6.3°C

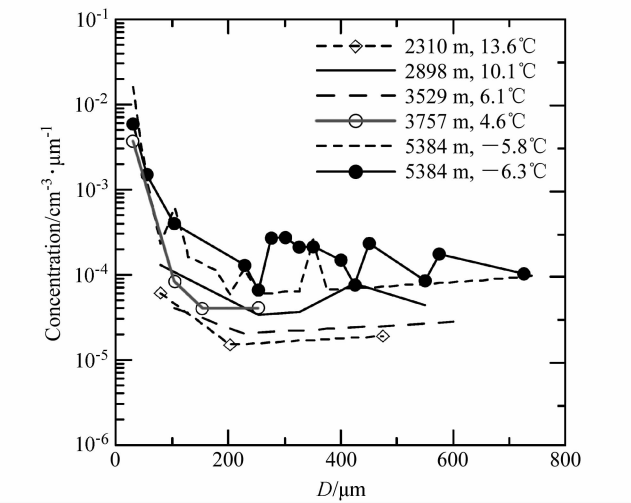


图 4 2003 年 8 月 15 日不同高度的粒子谱: 2310 m 层是雨滴谱; 2898 m 层是带有融化冰雪晶的雨滴谱; 3529 m 层是半融化雪团谱; 3757 m 层是边缘融化的雪团; 5384 m 层是冰雪晶结淞粒子谱; 5384 m 层是枝状冰雪晶或聚合体粒子谱

Fig. 4 The size distribution of cloud particles at different levels on 15 Aug 2003. The height of 2310 m with temperature of 13.6°C is the raindrop spectrum, the height of 2898 m with temperature of 10.1°C is the spectrum of the melted snow, the height of 3529 m with temperature of 6.1°C is the spectrum of semi-melted snow, the height of 3757 m with temperature of 4.6°C is the spectrum of edge-melted snow, the height of 5384 m with temperature of -5.8°C is the spectrum of ice crystal and snow aggregates, and the height of 5384 m with temperature of -6.3°C is the spectrum of dendritic crystals and ice aggregates

滴谱呈单峰分布, 谱宽较窄。云中的情况比较复杂, 0°C 层以下, 从云底部基本融化的雪团到云中半融化的雪团基本呈单峰分布, 谱宽较窄。0°C 层以上出现的冰雪结淞体和枝状冰雪晶或聚合体粒子都呈多峰结构, 越到高层多峰特征越明显, 谱宽愈宽。

图 5 给出了 8 月 15 日在 5370~5390 m (对应温度为 -7~-5°C) 高度水平飞行时 2D-GA2 和 King 液态水含量仪探测结果随时间的变化。为分辨云粒子的形态特征, 图 6 也给出了水平探测时得到的一些时刻的二维图像资料。King 探测结果显示过冷水含量的最大值约为 0.4 g/m³, 最小值约为 0.15 g/m³, 平均值为 0.2 g/m³, 可见 Sc 云中的过冷水含量分布是不均匀的。2D-GA2 所测的冰粒子直径起伏比较大, 最大值为 600 μm, 最小值为 50 μm, 相差一个量级。冰粒子浓度起伏也较大, 最大值约为 1.6 cm⁻³, 最小值几乎为零。从图像资料

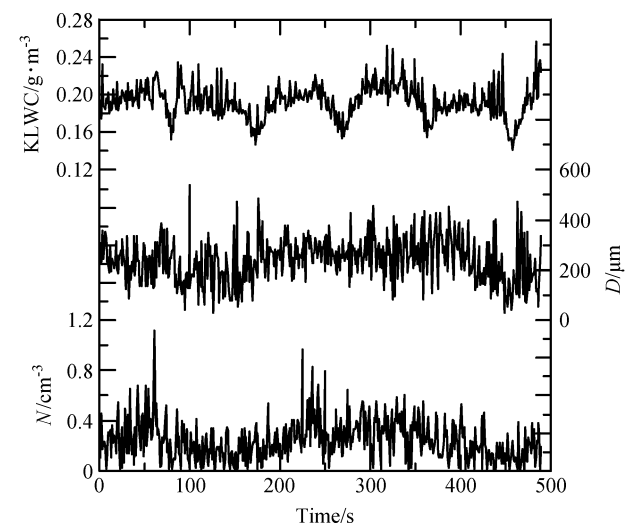


图 5 2003 年 8 月 15 日飞机水平探测时 2D-GA2 探测的冰粒子浓度、直径以及 King 含水量仪探测的液态水含量的时间变化分布。水平飞行高度为 5370~5390 m, 对应温度为 -7~-5°C

Fig. 5 Time series of number concentration and diameter sampled with 2D-GA2 and liquid water content during horizontal flight on 15 Aug 2003. Horizontal flight heights are from 5370 to 5390 m, temperature is from -7 to -5°C

(图 6) 可以看到, 云粒子基本为结淞雪团和聚合冰雪粒子。

图 7 是水平飞行时一些时刻的瞬时粒子谱。实线是结淞冰雪粒子谱, 呈多峰结构, 峰值出现在 40 μm、100 μm、220 μm 和 340 μm 处, 谱宽较宽, 可达 750 μm。虚点线是枝状聚合冰粒子谱, 也是多峰结构, 峰值出现在 40 μm、290 μm、450 μm 和 570 μm 处, 谱宽较宽, 可达 750 μm。带圆的虚线也是结淞冰粒子谱, 多峰结构不明显, 有双峰分布特征, 峰值出现在 40 μm、620 μm 处, 谱宽可达 750 μm。带菱形的虚线是结淞雪团谱, 呈单峰结构。冰粒子浓度在 10⁻¹~10⁻⁵ cm⁻³ · μm⁻¹ 之间变动。从分析可以看到, 尽管 Sc 水平不均匀, 但谱分布情况基本和垂直探测的结果一致。

3.4.2 St、As 云系探测

下面, 对 2003 年 9 月 4 日上午北京地区的一次层状云系飞行探测结果进行分析。从雷达监测结果显示此次云系过程从北京西南和南面方向移动而来, 范围较大。最大回波强度在 20~35 dBZ。地面降水比较均匀, 各测站 24 小时降水平均在 10 mm 左右。

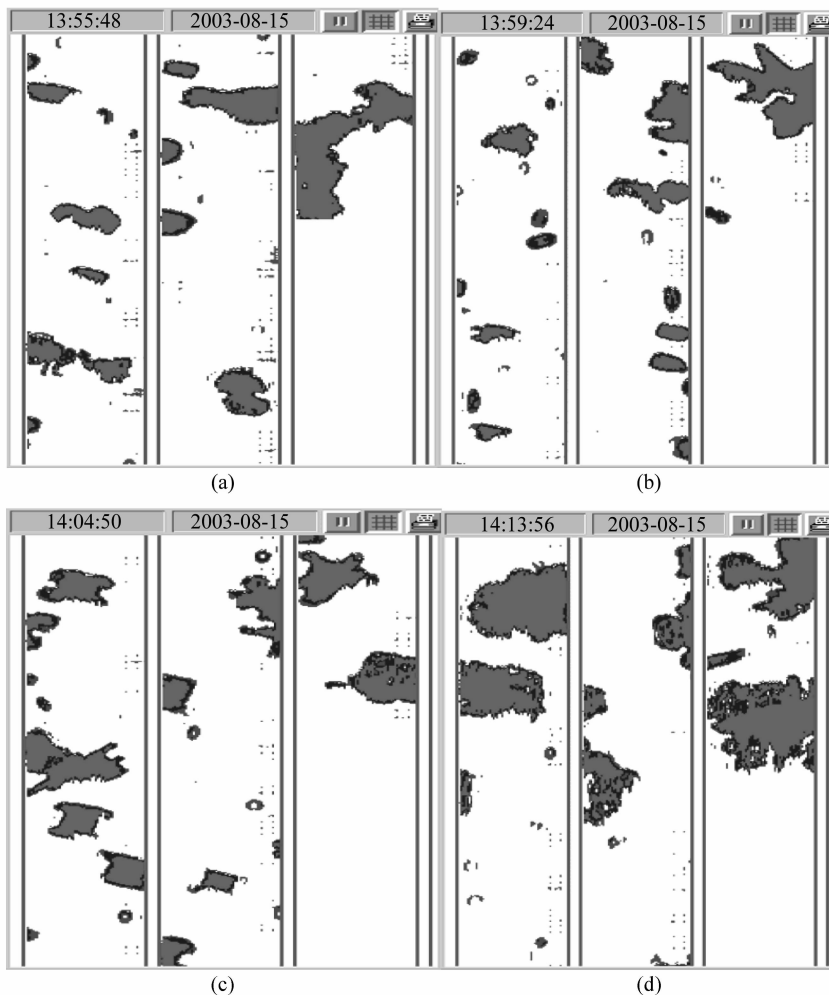


图6 2003年8月15日飞机水平探测时2D-GA2探测的二维粒子图像:(a) 结淞冰雪粒子,高度为5384 m,温度为 -5.8°C ; (b) 枝状聚合冰粒子,高度为5384 m,温度为 -6.3°C ; (c) 结淞冰粒子,高度为5381 m,温度为 -5.9°C ; (d) 结淞雪团粒子,高度5381 m,温度为 -5.6°C

Fig. 6 Two-dimensional particles images during horizontal detection with 2D-GA2 on 15 Aug 2003: (a) Ice snow particles at the height of 5384 m, and temperature of -5.8°C ; (b) dendritic crystal aggregates at the height of 5384 m and temperature of -6.3°C ; (c) ice crystal particles at the height of 5381 m and temperature of -5.9°C ; (d) ice snow crystal at the height of 5381 m and temperature of -5.6°C

图8给出了飞机爬升时FSSP-100、2D-GA2及King-LWC探测的云粒子特征量随高度的分布。为方便分析,图9也给出了此次探测过程获得的二维粒子图像。从FSSP-100探测的浓度分布结果看(图8a),云底在2500 m的高度, 0°C 层在3500 m左右。因为是来自南面的较暖云系, 0°C 层比较低。在 0°C 层以上的3500~5200 m区间的粒子浓度基本保持不变,而5200 m (-10°C)以上,粒子浓度增加较大,特别在6500~7000 m的高空,粒子浓度达到 120 cm^{-3} 以上,最大值为 144 cm^{-3} ,然后,随高度迅速减小。从直径随高度分布看(图8b),从云底到5200 m左右,大部分的云滴或冰粒子直

径很小,5200 m以上出现的粒子尺度比较大,最大值为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。King-LWC显示液态含水量比较大,达 0.3 g/m^3 左右(图8c),云中液态水含量随高度缓慢减小,基本处于 $0.1\sim 0.2\text{ g/m}^3$ 的范围。另外,底层1000~2500 m, FSSP测得的云粒子浓度约为 $20\sim 40\text{ cm}^{-3}$,而粒子尺度却在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下,2D-GA2没有测到粒子,King-LWC测值在 $0.2\sim 0.4\text{ g/m}^3$,在3200 m (0°C 层高度)以上, FSSP、GA2测值明显高于低层,但King-LWC却小于低层为 $0.1\sim 0.2\text{ g/m}^3$ 。根据宏观记录分析,主要是因为低层有来自上层下落的雨水。而高层却没有对应低层雨滴那样的大冰晶粒子。

2D-GA2 探头显示的大粒子浓度和直径分布(图 8d、e)表明,大粒子基本为冰粒子,而且位于 0°C 层以上,探测期间无降水产生。大冰粒子浓度的垂直分布非常不均匀,具有垂直分层特征,导致浓度出现较大的变化。大冰粒子浓度基本在 $0.01\sim 1\text{ L}^{-1}$ 左右,直径在 $250\text{ }\mu\text{m}$ 左右。从图像资料(图

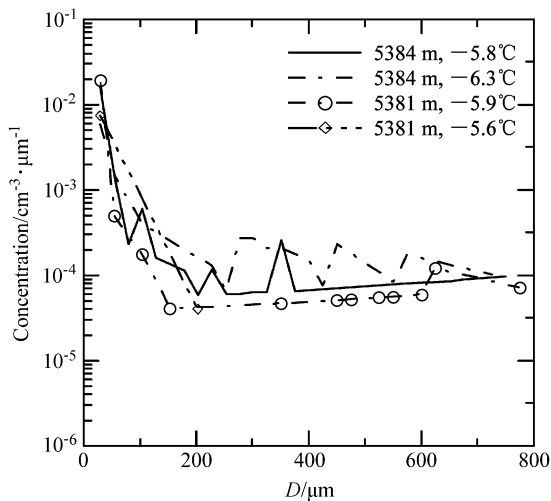


图 7 2003 年 8 月 15 日飞机水平探测时 2D-GA2 所测的冰粒子瞬时谱。5384 m 层为结淞冰雪粒子谱; 5384 m 层为枝状聚合冰粒子谱; 5381 m 层为结淞冰粒子谱; 5381 m 层为结淞雪团谱

Fig. 7 The size distribution derived from horizontal flight with probe 2D-GA2 on 15 Aug 2003. The spectrum for the rimed ice and snow particles is at the height of 5384 m and temperature of -5.8°C , dendritic crystal aggregates at the of height of 5384 m and temperature of -6.3°C , rimed ice and snow at the height of 5381 m and temperature of -5.9°C , rimed snow aggregate at the height of 5381 m and temperature of -5.6°C

9) 可以看到,在 $4776\sim 5430\text{ m}$ 高度,对应温度为 $-5.9\sim -8^{\circ}\text{C}$,主要是柱状冰晶和少量结淞体。从 $-8\sim -12^{\circ}\text{C}$ 层显示基本为结淞粒子,其浓度分布表现出垂直分布存在不均匀特性,平均直径有所增大。而 -20°C 层左右表现出较多的枝状冰粒子。 $-12\sim -19.9^{\circ}\text{C}$ 区间,粒子形状由枝状转换为结淞,此区间的冰粒子浓度比较高,特别是尺度比较大。由于没有更高层的探测结果,无法知道 -20°C 以上的情况,由于结淞等过程可能较强,因此此层有 $750\text{ }\mu\text{m}$ 左右的大结淞粒子出现。

图 10 给出了 2003 年 9 月 4 日 2D-GA2 探头垂直探测云系时,在 4 个不同高度上的冰粒子谱。 4776 m 对应温度 -5.9°C 为柱状冰晶,其谱有双峰特征,峰值出现在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $280\text{ }\mu\text{m}$ 处,谱宽较窄,最宽为 $290\text{ }\mu\text{m}$ 。 5430 m 对应温度是 -8°C 是结淞冰粒子,其谱呈单峰结构,峰值出现在 $40\text{ }\mu\text{m}$ 处,谱宽只有 $90\text{ }\mu\text{m}$ 。 6219 m 对应温度是 -12°C ,出现结淞冰粒子,其谱仍然是单峰分布,峰值也在 $40\text{ }\mu\text{m}$ 处,但谱宽较宽,为 $600\text{ }\mu\text{m}$ 。 7490 m 对应温度是 -19.9°C ,出现层枝状冰粒子,其谱是单峰结构,谱宽最宽,可达 $680\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 11 是 9 月 4 日飞机在 $-18.5\sim -19.9^{\circ}\text{C}$ 层水平飞行时,2D-GA2 探测的冰粒子浓度、直径及 King 液态水含量随时间的变化。可以看出,层状云水平分布很不均匀。液态水含量的最大值约为 0.14 g/m^3 ,最小值仅为 0.09 g/m^3 。2D-GA2 所测的冰粒子直径起伏比较大,最大值为 $600\text{ }\mu\text{m}$,最小值几乎为 0。冰粒子浓度起伏较大,最大值约为

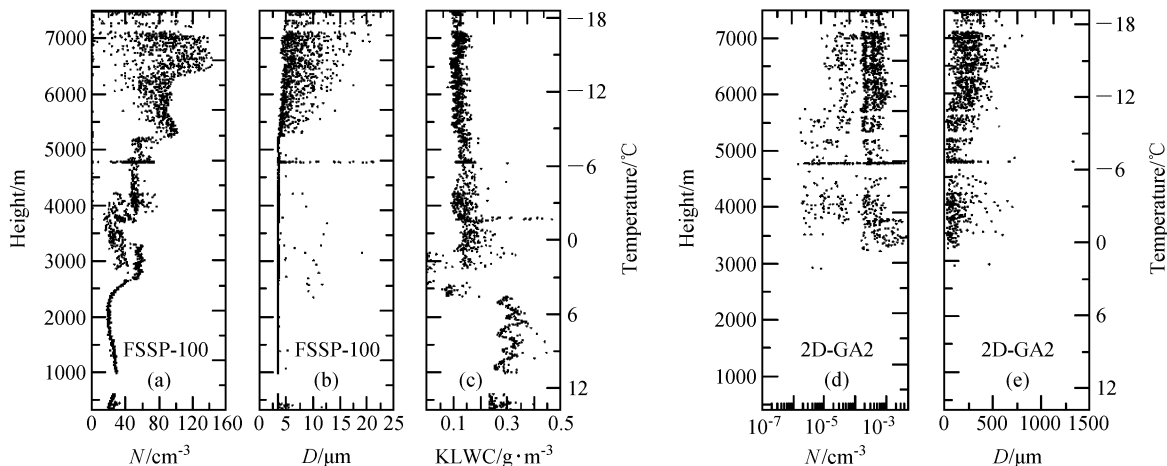


图 8 同图 2, 但为 2003 年 9 月 4 日

Fig. 8 Same as Fig. 2 except on 4 Sep 2003

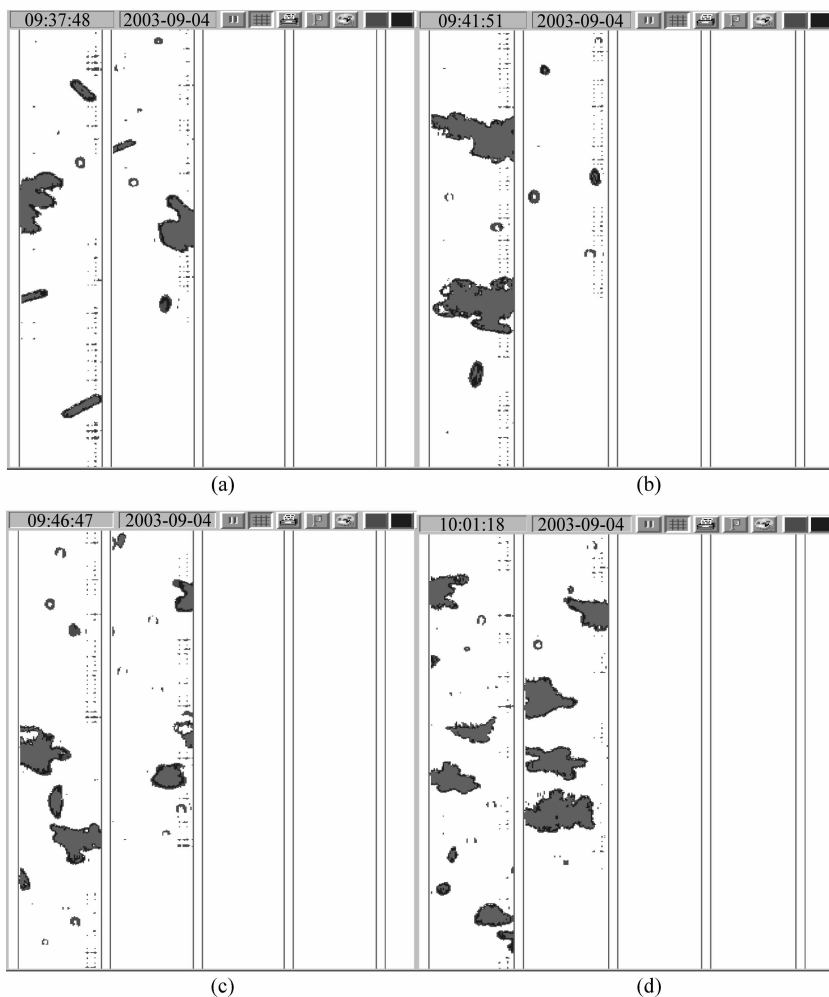


图9 2003年9月4日上午机载2D-GA2垂直探测的二维粒子图像:(a)柱状冰晶及结凇体,对应高度为4776 m,温度为 -5.9°C ; (b)冰雪结凇体,对应高度为5430 m,温度为 -8°C ; (c)结凇雪团,对应高度为6219 m,温度为 -12°C ; (d)枝状冰晶,对应高度为7490 m,温度为 -19.9°C

Fig. 9 Two-dimensional particles images of vertical detection with 2D-GA2 on 4 Sep 2003: (a) The columnar crystal and rimed aggregates at the height of 4776 m with temperature of -5.9°C ; (b) the rimed ice and snow at height of 5430 m with temperature of -8°C ; (c) rimed snow aggregate at the height of 6219 m with temperature of -12°C ; (d) the dendritic rimed snow at the height of 7490 m with temperature around -19.9°C

1.6 cm^{-3} , 最小值几乎为零。从水平飞行得到的冰粒子谱分布(图12)来看,谱的结构很相似,都为单峰谱,峰值出现在 $40\text{ }\mu\text{m}$,谱宽较宽,可达 $800\text{ }\mu\text{m}$ 。大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的大粒子浓度很接近,但小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的小粒子浓度差别较大,有2~3个量级的变化,是水平不均匀造成的。

从此次层状云的探测结果可以看到,层状云垂直和水平分布不均匀特性都很明显。在5200 m (-10°C)以上,特别在6500~7000 m的高空,冰晶浓度较大,达到 120 cm^{-3} 以上,冰晶尺度也比较大,最大值为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。云中液态水含量随高度缓慢

减小,基本处于 $0.1\sim 0.2\text{ g/m}^3$ 的范围。在 $-5.9\sim -8^{\circ}\text{C}$ 层,主要是柱状冰晶和少量结凇体, $-8\sim -12^{\circ}\text{C}$ 层显示基本为结凇粒子, -20°C 层左右表现出较多的枝状冰粒子。大冰粒子浓度基本在 $0.01\sim 1\text{ L}^{-1}$ 左右,直径在 $250\text{ }\mu\text{m}$ 左右,最大可达 $750\text{ }\mu\text{m}$ 。柱状冰晶谱,有双峰特征,峰值出现在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $280\text{ }\mu\text{m}$ 处,谱宽较窄,最宽为 $290\text{ }\mu\text{m}$ 。结凇和枝状冰粒子谱,均呈单峰结构。

3.4.3 云中平均谱特征

图13给出了2003年8月15日和9月4日FSSP-100、2D-GA2探头所测的不同温度区的平均

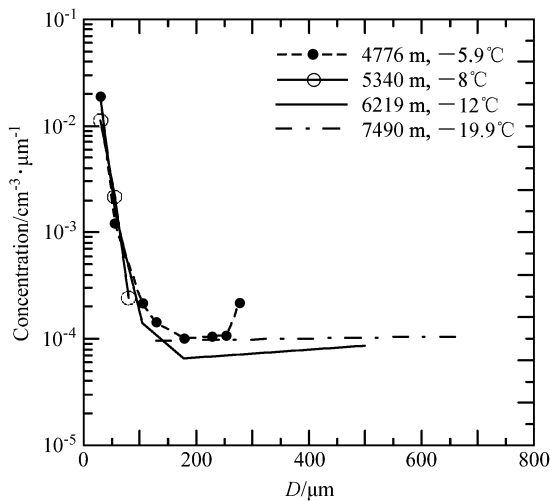


图 10 2003 年 9 月 4 日不同高度的冰粒子谱: 4776 m 层表示柱状冰晶及结凇体谱; 5340 m 层表示冰雪结凇体谱; 6219 m 层表示结凇雪团谱; 7490 m 层表示枝状冰晶谱

Fig. 10 The spectrum of ice particles at different height levels on 4 Sep 2003. The height of 4776 m with temperature around -5.9°C shows spectrum for columnar and rimed ice crystals, that for rimed ice and snow at height of 5340 m with temperature around -8°C , that for rimed snow aggregates at height of 6219 m with temperature around -12°C , and that for dendritic ice crystal at height of 7490 m with temperature about -19.9°C .

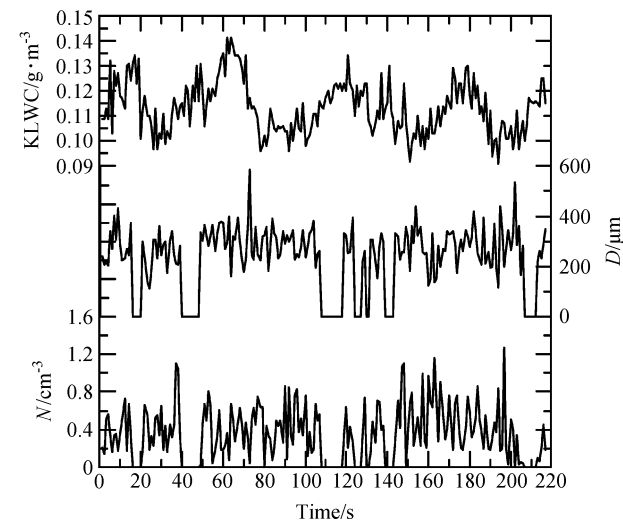


图 11 2003 年 9 月 4 日飞机在 7420~7490 m、 $-18.5\sim-19.9^{\circ}\text{C}$ 层水平探测时 2D-GA2 探测的冰粒子浓度、粒子直径及 King 液态水含量随时间的变化

Fig. 11 Time series of ice number concentration and diameter detected with 2D-GA2 and liquid water content on 4 Sep 2003. The flight height is from 7420 to 7490 m with temperature around -18.5 to -19.9°C

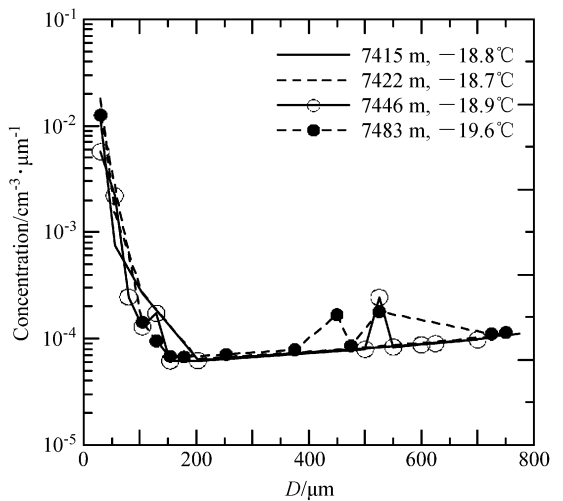


图 12 2003 年 9 月 4 日飞机水平探测时 2D-GA2 所测的冰晶粒子瞬时谱 (均为枝状冰晶)

Fig. 12 The size distribution of ice particles (all are dendritic crystals) detected with 2D-GA2 probe on 4 Sep

粒子谱。8 月 15 日 2D-GA2 测到的 Sc 云系的平均粒子谱的谱型很相似, 基本为单峰谱分布, 谱宽达到 $1500\text{ }\mu\text{m}$ (图 13a)。由前面的分析可知, 0°C 层以上基本为结凇或枝状及其聚合体, 所以对应的谱型非常接近。 0°C 层以下到云底为部分融化的冰粒子, 而云底以下为雨滴粒子, 所以显示的谱存在一些差异。总体上来看, 越到云低层, 云粒子浓度越低, 说明只有部分长大后的粒子才能掉到下层融化形成降雨。8 月 15 日 FSSP-100 所测的 Sc 云系的平均粒子谱的谱型相似, 为多峰谱, 谱宽达 $47\text{ }\mu\text{m}$, 在 $15\text{ }\mu\text{m}$ 和 $23\text{ }\mu\text{m}$ 处有较大的起伏。9 月 4 日的 St 云系谱型为多峰谱, 谱宽最大可为 $47\text{ }\mu\text{m}$, 在 $-12\sim-8^{\circ}\text{C}$ 温度段内的谱宽较窄, 只有 $28\text{ }\mu\text{m}$, 说明温度越低, 小云滴尺度越小。

9 月 4 日 As 云系的大粒子谱分布差异比较大 (图 13b)。因为 $-8\sim-12^{\circ}\text{C}$ 层基本为结凇粒子, 图 10 得到的 -8°C 层和 -12°C 层显示的谱分布基本为单峰分布, 且最大谱宽为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。但这里 $-8\sim-12^{\circ}\text{C}$ 层的平均谱表现出明显的双峰分布特征, 峰值出现在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $700\text{ }\mu\text{m}$ 处, 且谱宽达到近 $1300\text{ }\mu\text{m}$ 。谱宽出现的明显差异主要是因为整层平均包含了多次水平探测结果, 水平探测时往往穿越较强对流泡区域。 $-8\sim 0^{\circ}\text{C}$ 有大量的柱状冰粒子, 小于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的谱, 与 $-12\sim-8^{\circ}\text{C}$ 层粒子谱非常一致, 但大于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的大粒子端谱分布起伏较大, 出现

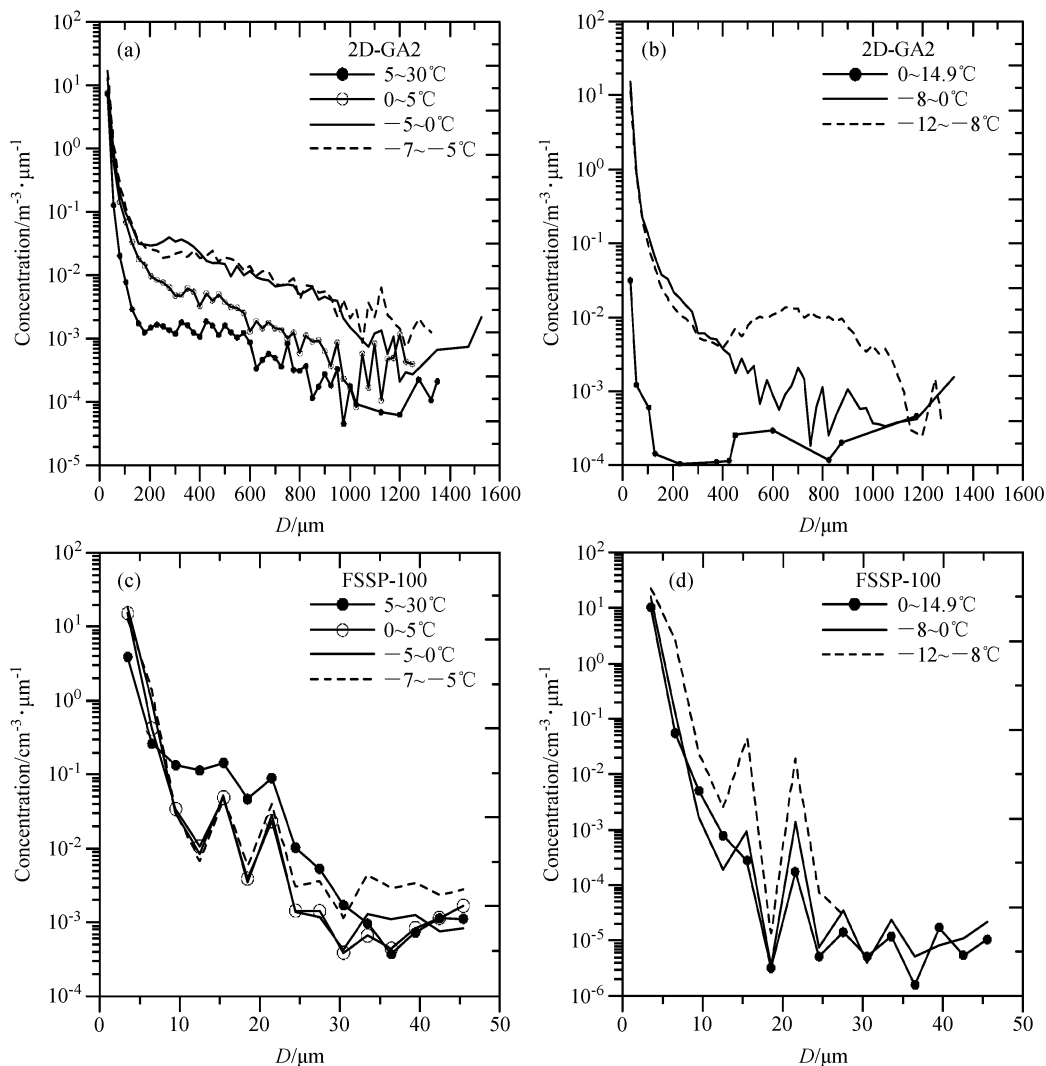


图 13 飞机爬升过程中 2D-GA2 (a、b)、FSSP-100 (c、d) 探头所测的不同温度区的平均粒子谱: (a、c) 8 月 15 日; (b、d) 9 月 4 日

Fig. 13 Averaged size distributions of cloud particles at different temperature levels detected with 2D-GA2 (a, b) and FSSP-100 (c, d) in ascending flight on 15 Aug (a, c) and 4 Sep (b, d)

多峰特征, 谱宽达到 $1400 \mu\text{m}$ 。由图 8 的垂直分布情况可以看到, 0°C 以下的雨滴粒子很少, 因此, $0 \sim 14.9^\circ\text{C}$ 温度层的粒子浓度很小, 无法得到谱分布特征。图 13c、d 显示的 FSSP-100 小云粒子的谱型具有很好的相似性, 这对于云滴、冰晶的谱分布描述是重要的信息。

4 结论

通过对 2003 年 8~9 月 4 次飞机探测结果, 特别是对资料比较完整的 8 月 15 日 Sc 云和 9 月 4 日 St、As 云系进行了较详细的分析, 结果总结如下:

(1) FSSP-100 测量的小云粒子 (云滴或冰晶) 最大浓度的变化范围从层积云的 120 cm^{-3} (8 月 21

日) 到深厚高层云的 183 cm^{-3} (9 月 4 日), 平均直径一般在 $7.22 \sim 16.05 \mu\text{m}$, 且最大直径的粒子出现在高层云观测中。2D-GA2 探头观测的最大粒子浓度变化范围从 $2.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ 到 $3.29 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 。King 测量的层积云最大液态水含量变化范围为 $0.423 \sim 0.691 \text{ g/m}^3$ 。

(2) 层积云存在明显的垂直和水平不均匀性。云下基本为雨滴, 雨滴谱呈单峰谱分布, 谱宽较窄。云中 0°C 层以下, 云中基本为半融化或基本融化的雪团等, 谱呈单峰分布, 谱宽较窄。 0°C 层以上出现的冰雪结淞体和枝状冰雪晶或聚合体粒子都呈多峰结构, 越到高层多峰特征越明显, 谱宽愈宽。

(3) 层状云垂直和水平分布不均匀特性很明显。高空(-10°C 层以上)有较大的冰晶浓度, 达到 120 cm^{-3} 以上, 冰晶尺度也比较大, 最大值为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。云中液态水含量随高度缓慢减小, 基本处于 $0.1\sim 0.2\text{ g/m}^3$ 的范围。在 $-5.9\sim -8^{\circ}\text{C}$ 层, 主要是柱状冰晶和少量结凇体, $-8\sim -12^{\circ}\text{C}$ 层显示基本为结凇粒子, -20°C 层左右表现出较多的枝状冰粒子。大冰粒子浓度基本在 $0.01\sim 1\text{ L}^{-1}$ 左右。

(4) 层积云和层状云的平均谱存在明显的差异。Sc云系的平均粒子谱的谱型很相似, 基本为单峰分布, 谱宽达到 $1500\text{ }\mu\text{m}$ 。越到云低层, 云粒子浓度越低。As云系的大粒子谱分布差异比较大。 $-8\sim -12^{\circ}\text{C}$ 层的平均谱表现出明显的双峰分布特征, 峰值出现在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $700\text{ }\mu\text{m}$ 处, 且谱宽达到近 $1300\text{ }\mu\text{m}$ 。 $-8\sim 0^{\circ}\text{C}$ 有大量的柱状冰粒子, 小于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的谱, 与 $-12\sim -8^{\circ}\text{C}$ 层粒子谱非常一致, 但大于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的大粒子端谱分布起伏较大, 出现呈现多峰特征, 谱宽达到 $1400\text{ }\mu\text{m}$ 。

参考文献 (References)

- [1] 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. Appl. Meteor*, 1975, **14** (5): 805~818
- [2] Houze R A, Hobbs P V, Herzegh P H, et al. Size distributions of precipitation particles in frontal clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 156~162
- [3] Lo K K, Passarelli R E. The growth of snow in winter storms: An airborne observational study. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 697~706
- [4] Gorden G L, Marwitz J D, Bradford M. Hydrometeor distributions in California rainbands. Conference on Cloud Physics, Chicago, 1982. 207~210
- [5] Grabowski W W, Wu W X, Moncrieff M W. Cloud resolving modeling of tropical clouds systems during Phase III: Effects of cloud microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 2384~2402
- [6] 何绍钦. 西安市一次晴空气溶胶粒子的观测分析. *气象*, 1987, **13** (5): 19~22
He Shaoqing. A case analysis of aerosol particles observation under fine weather over Xian. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1987, **13** (5): 19~22
- [7] 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. *气象科学研究院院刊*, 1986, **6** (1): 54~58
Chen Wankui, Ma Peimin. The microphysical characteristics and the mechanism of the precipitation of the stratiform cloud in Sichuan Province in spring. *Journal of Academy of Meteorological Science* (in Chinese), 1986, **6** (1): 54~58
- [8] 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. *气象科学研究院院刊*, 1987, **10** (2): 144~150
Chen Wankui, You Laiguang. A case study on microphysical characteristics of precipitation particles near the melting layer. *Journal of Academy of Meteorological Science* (in Chinese), 1987, **10** (2): 144~150
- [9] 廖飞佳, 张建新, 黄钢. 北疆冬季层状云微物理结构初探. *新疆气象*, 1996, **19** (5): 31~34
Liao Feijia, Zhang Jianxin, Huang Gang. The preliminary investigation on cloud microphysical structure of stratiform clouds in northern Xinjiang. *Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 1996, **19** (5): 31~34
- [10] 樊曙先. 层状云微物理结构演变特征的个例研究. *宁夏大学学报 (自然科学版)*, 2000, **21** (2): 180~182
Fan Shuxian. A case study on the evolution of microphysical structure of stratiform cloud. *Journal of Ningxia University* (Natural Science Edition) (in Chinese), 2000, **21** (2): 180~182
- [11] 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. *气象*, 1997, **23** (5): 3~7
Zhang Lianyun, Feng Guili. Study of the microphysical structure and seedable conditions of stratiform clouds in spring and fall. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1997, **23** (5): 3~7
- [12] 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. *应用气象学报*, 2003, **22** (6): 584~589
Su Zhenjun, Liu Weiguo, Wang Guanghe, et al. Microphysical characteristics of a precipitation process in Qinghai Province. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **22** (6): 584~589
- [13] 郭学良, 付丹红. 北京一次典型灾害性雹暴、大风的形成过程与云物理特征. *科学通报*, 2003, **48** (增刊2): 65~69
Guo Xuelian, Fu Danhong. The formation process and cloud physical characteristics for a typical disastrous wind-producing thunderstorm in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (Suppl. II): 77~82
- [14] 付丹红, 郭学良, 肖稳安, 等. 北京2001年8月23日一次大风和强降水天气过程形成机理的数值模拟研究. *南京气象学院学报*, 2003, **26** (2): 190~200
Fu Danhong, Guo Xueliang, Xiao Wenan, et al. Numerical study on the formation a severe storm accompanied with gale and heavy rain in Beijing. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (2): 190~200
- [15] Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 295~311
- [16] 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. *高原气象*, 2001, **20** (2): 191~196
Li Lunge, Deligeer. Analyses of microphysical feature for

- spring precipitation cloud layers in east of Qinghai. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2001, **20** (2): 191~196
- [17] 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. *高原气象*, 2003, **22** (6): 584~589
Li Zhaorong, Li Rongqing, Li Baozi. Analyses on vertical microphysical characteristics of autumn stratiform cloud in Lanzhou region. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2003, **22** (6): 584~589
- [18] 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. *甘肃气象*, 2002, **20** (3): 21~23
Li Zhaorong, Li Baozi, Pang Chaoyun, et al. The characteristic of ice-snow crystals of stratiform-type cloud in autumn in Gansu Province. *Gansu Meteorology (in Chinese)*, 2002, **20** (3): 21~23
- [19] 冯桂利. 一次冷涡云系微物理结构及雪粒子增长机制的分析. *山东气象*, 1993, **13** (1): 37~41
Feng Guili. The analyses of microphysical structure and mechanism of snow particle growth for a cold vortex cloud. *Shandong Meteorology (in Chinese)*, 1993, **13** (1): 37~41
- [20] 张景红, 郑矫恒, 谷淑芳. 一次典型积层混合云降水的综合探测分析. *吉林气象*, 2004, **3**: 6~8
Zhang Jinghong, Zheng Jiaoheng, Gu Shufang. The comprehensive observation analyses on a typical stratiform and cumulus mixed precipitating cloud. *Jilin Meteorology (in Chinese)*, 2004, **3**: 6~8
- [21] 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. *高原气象*, 2005, **24** (1): 85~90
Yang Wenxia, Niu Shengjie, Wei Junguo, et al. Airborne observation for microphysical structure of precipitation system of stratiform cloud in Hebei Province. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2005, **24** (1): 85~90
- [22] Hobbs P V, Rangno A L. Ice particle concentrations in clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42** (23): 2523~2549
- [23] 王以琳, 雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验. *大气科学*, 2003, **27** (5): 929~938
Wang Yilin, Lei Hengchi. Test of cold cloud seeding. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2003, **27** (5): 929~938
- [24] 刘晓莉, 牛生杰, 陈跃. 层状云催化后过冷水分布与演变规律的数值模拟. *大气科学*, 2006, **30** (4): 561~569
Liu Xiaoli, Niu Shengjie, Chen Yue. Numerical simulation of distribution and evolution of supercooled liquid water in seeding stratiform cloud. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2006, **30** (4): 561~569
- [25] 刘红燕, 雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征. *大气科学*, 2006, **30** (4): 693~702
Liu Hongyan, Lei Hengchi. Characteristics of rain from stratiform versus convective cloud based on the surface rain-drop data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2006, **30** (4): 693~702