

范烨, 郭学良, 张佃国, 等. 2010. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究 [J]. 大气科学, 34 (6): 1187–1200.  
Fan Ye, Guo Xueliang, Zhang Dianguo, et al. 2010. Airborne particle measuring system measurement on structure and size distribution of stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1187–1200.

# 北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究

范烨<sup>1</sup> 郭学良<sup>2</sup> 张佃国<sup>3</sup> 付丹红<sup>4</sup> 陈建东<sup>1</sup> 马跃琨<sup>1</sup>

1 南京市气象局, 南京 210009

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 山东省人工影响天气办公室, 济南 250031

4 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘 要** 2004 年 8~9 月利用机载粒子测量系统 (Particle Measuring System, 简称 PMS) 对我国北京及周边地区的三次锋面云系进行了探测, 本文分析了三次降水性层积云中各种粒子的垂直、水平和谱分布。结果表明, 三次降水云系基本是冷锋或者暖锋系统下形成的层积混合云系。云内以直径  $5\sim 9\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$  和  $400\sim 1000\ \mu\text{m}$  的云和降水粒子为主。9 月 14 日暖锋层积云系的粒子浓度最大, FSSP-100 (前向散射粒子谱探头)、GA2 (二维灰度云粒子图像探头)、GB2 (二维灰度降水粒子探头) 分别探测的最大粒子浓度为  $318.97\ \text{cm}^{-3}$ 、 $0.03\ \text{cm}^{-3}$ 、 $0.0065\ \text{cm}^{-3}$ 。8 月 12 日和 8 月 15 日的冷锋层积云系有多个干层。GA2 探测的平均浓度谱基本为单峰分布, 并找出了合适的拟合函数。冷锋层积云系的负温云层中存在着相同浓度量级的过冷云水和雨水、霰粒、柱状和针状冰晶, 过冷水含量可达到  $0.26\ \text{g}/\text{m}^3$ , 暖锋云系中则以霰粒、结凇粒子和冰雪晶聚合体为主, 也存在少量柱状、针状冰晶和过冷水滴。与我国北方地区 13 架次飞行探测结果比较, 北京及周边地区 2003 年 8 月 15 日、2004 年 8 月 12 日和 9 月 14 日层积云  $0\ ^\circ\text{C}$  层以上的冰雪晶粒子直径最大, 浓度居中, 过冷水含量因云系结构不同而变化较大。

**关键词** 机载粒子测量系统 北京及周边地区 层积云 分布特征

**文章编号** 1006-9895 (2010) 06-1187-14

**中图分类号** P426.5

**文献标识码** A

## Airborne Particle Measuring System Measurement on Structure and Size Distribution of Stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and Its Surrounding Areas

FAN Ye<sup>1</sup>, GUO Xueliang<sup>2</sup>, ZHANG Dianguo<sup>3</sup>, FU Danhong<sup>4</sup>,  
CHEN Jiandong<sup>1</sup>, and MA Yueli<sup>1</sup>

1 Nanjing Bureau of Meteorology, Nanjing 210009

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** By using probes of FSSP-100, GA2 and GB2 of an airborne PMS (Particle Measuring System), the stra-

**收稿日期** 2010-02-03, 2010-06-13 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40333033, 国家科技部“十一五”科技支持课题 2006BAC12B03, 中国科学院知识创新项目 KZCX3-SW-225, 山东省气象局重点课题“山东省积层混合云微物理特征分析”(2009sdqxzl6)

**作者简介** 范烨, 女, 1976 年出生, 硕士, 研究方向为云降水物理和人工影响天气。E-mail: fanqinxin090816@163.com

stratocumulus clouds during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas were probed. The results showed that the diameter of particles was primarily distributed around  $5-9\text{ }\mu\text{m}$ ,  $200\text{ }\mu\text{m}$  and  $400-1000\text{ }\mu\text{m}$ . On 14 September 2004, the warm frontal stratocumulus presents the maximum number concentration of  $318.97\text{ cm}^{-3}$ ,  $0.03\text{ cm}^{-3}$ , and  $0.0065\text{ cm}^{-3}$  measured by FSSP-100, GA2, and GB2, respectively. On 12 August and 15 August, 2004, controlled by the cold frontal system, several dry layers were observed. The size distributions of particles derived from probe GA2 in the three flights mainly followed unimodal distribution and the better fitting function was found. Based on the analyses of two-dimensional images of probe GA2, the unimodal distribution was primary for different particles of natural condition. The supercooled cloud and rain water, graupel, columnar and needle crystal have the same order of number concentration above  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  layer in the cold frontal clouds. The peak content of supercooled water was  $0.26\text{ g/m}^3$ . In the warm frontal clouds, graupel, riming particles, and large aggregates were the main ice particles, and the supercooled water, columnar and needle crystals were measured. Compared with the GA2 data above the layer of  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 13 flights over northern China, stratocumulus clouds over Beijing and its surrounding areas present the maximum diameter of ice and snow crystal, the middle number concentration, and different content of supercooled water depending on different stratocumulus structures.

**Key words** particle measuring system, Beijing and its surrounding areas, stratocumulus, distribution property

## 1 引言

云微物理结构是影响云降水过程非常重要的因素之一。云层内相关参数分布和变化特征很复杂,但随着现代化探测设备的不断发展,这方面的研究已经在很多地区展开,并受到高度重视。粒子测量系统(Particle Measuring System, 简称 PMS)是 20 世纪 70 年代后期开始在世界各地逐步广泛采用的云物理观测仪器(姚展予等, 2004)。该探测仪器装载于飞机两翼下方,可对云粒子进行连续采样,提供云中粒子的形态、空间分布情况和谱特征。我国在新疆(王谦等, 1987)、宁夏(牛生杰等, 1992)、山东(张连云和冯桂利, 1997)、河南(李念童等, 2001)、陕西(陈保国等, 2005)、甘肃(李照荣等, 2003)、吉林(张景红等, 2004)、河北(杨文霞等, 2005)、北京[2003 年(张佃国等, 2007a, 2007b)、2004 年(范烨等, 2007)]等地利用装载有 PMS 的飞机进行了大量的云物理结构的探测试验,为我国在人工影响天气、飞机积冰等方面的研究提供了云的宏、微观特征资料。

研究表明,云微物理结构的特性在不同地区、不同季节具有较大差异。在热带层状云观测中(Stith et al., 2002),基本没有探测到过冷水含量, PMS 的二维图像中很难分辨出轻度结凇的冰粒子,由于聚合作用,冰粒子的大小随高度降低而增加,凇附过程在冰粒子的成长过程中没有发挥大的作用,霰的数量也很少。但在冬季混合云中,飞机却

观测到有大量的过冷水,含量超过  $0.4\text{ g/m}^3$ (Tremblay et al., 2003)。

因此,对不同气候背景条件下的云宏微观结构进行探测研究是非常有意义的。层积云系是我国华北地区的主要降水云系,了解其形成和结构有利于中尺度云数值模式的验证和改进。2004 年 8、9 月间,装载有 PMS 粒子测量系统的“运-12”型大气探测飞机对北京及其周边地区的降水云进行了飞行探测研究,本文利用其中的三次探测资料,进行了层积混合云结构、云粒子谱分布特征的研究。

## 2 飞机探测与分析方法

### 2.1 探测设备

机载探测设备包括:(1)卫星定位系统(Globe Positioning System, 简称 GPS);(2)机载粒子探测设备 PMS;(3)温度、露点、高度、空速和液态水含量等云中宏观参数传感器,详见表 1。其中, FSSP-100 的分辨率是  $2.0\text{ }\mu\text{m}$ , GA2、GB2 探头的分辨率分别在  $30\text{ }\mu\text{m}$  和  $150\text{ }\mu\text{m}$  左右。各探测仪器采样频率为  $1\text{ s}$ 。因 KLWC-5 液水含量仪工作不正常,因此文中没有分析该探头的数据。

### 2.2 探测飞行概况

本文以飞机上升阶段探测到的云的分布特征作为主要研究对象,表 2 列出了 2004 年 8 月 12 日、8 月 15 日和 9 月 14 日这三个架次在上升阶段的飞行概况。飞机每次从北京北部的昌平沙河机场起飞,该机场距北京市区大约  $30\text{ km}$ 。飞行区域在北京的

表 1 机载探测设备基本情况  
Table 1 Airborne measuring equipments

| 名称                | 探测范围                    | 安装位置      | 作用            |
|-------------------|-------------------------|-----------|---------------|
| GPS               | —                       | 天线安装在机舱前部 | 精确获得探测平台方位    |
| PDS500 数据采集控制设备   | —                       | 机舱内       | 记录原始数据        |
| FSSP-100 前向散射粒谱探头 | 3~31 μm, 共 15 个通道       | 右翼下方      | 探测小云粒子        |
| GA2 二维灰度云粒子图像探头   | 30~1860 μm, 共 62 个通道    | 左翼下方      | 探测云及降水粒子及图像   |
| GB2 二维灰度降水粒子图像探头  | 150~9300 μm, 共 62 个通道   | 左翼下方      | 探测降水粒子及图像     |
| 铂电阻反流式温度计         | −100~ +100 ℃            | 右翼下方      | 环境温度          |
| G. B. 1011B 露点温度计 | −75~ +50 ℃              | 左翼下方      | 环境露点温度        |
| 542K2 高度空速转换盒     | 0~15000 m, 140~650 km/h | 机舱前部下方    | 获取探测平台高度及移动速度 |
| KLWC-5 液态水含量仪     | 0~6 g/m <sup>3</sup>    | 左翼下方      | 探测区液态水含量      |

表 2 2004 年 3 个架次上升阶段飞行概况  
Table 2 Three general flight situations during ascent phase in 2004

| 日期       | 探测时间              | 探测区域        | 探测垂直范围/m  | 温度区间/℃       |
|----------|-------------------|-------------|-----------|--------------|
| 8 月 12 日 | 06:26:45~08:45:21 | 昌平、怀来、赤城、丰宁 | 1801~5835 | −6.05 ~14.91 |
| 8 月 15 日 | 10:46:00~11:56:03 | 昌平、怀来、赤城、怀柔 | 41~6601   | −14.51~21.53 |
| 9 月 14 日 | 15:47:29~17:47:02 | 昌平、怀来、赤城、密云 | 41~6937   | −14.67~18.85 |

注：探测时间为北京时（下同）

西北部 and 邻近的河北部分地区上空；飞行时间依次分别在早晨、上午和下午；最长飞行时间 139 min，最短 70 min。

垂直地面方向上的飞行路线基本上采用爬升—平飞—爬升方式。9 月 14 日飞行探测高度最高 6937 m (−14.67 ℃)，最低的是 8 月 12 日 5835 m (−6.05 ℃)。8 月 12 日两次平飞平均高度是 4196 m (3.92 ℃) 和 5367 m (−2.50 ℃)，飞行时间分别是 14 min 和 92 min；8 月 15 日主要平飞平均高度 3002 m (−0.36 ℃)，飞行时间 20 min；9 月 14 日平飞平均高度 4708 m (−4.56 ℃)，飞行时间 77min。

根据飞行记录、北京沙河机场场站记录、各自动气象站降水量记录以及雷达回波演变特征分析，8 月 11 日晚 12 时后开始出现降水，雨量逐渐增大，较强降水持续到 12 日晚 12 时左右；8 月 15 日是比较稳定的小雨过程，14 点以后雨量开始减少至降水停止；9 月 14 日中午开始出现稳定性降水，强降水持续至 15 日。因此，三次探测时飞机都是在小雨中起飞，8 月 12 日和 9 月 14 日架次的上升飞行处于云系发展阶段，8 月 15 日则在云系发展后期至消散阶段。

2.3 统计分析方法

本文中各微物理量的计算方法如下：

平均直径： $D = \sum (D_i \times N_i) / N$ ,

数浓度： $N_i = n_i / V \times \Delta D_i$ ,

浓度： $N = \sum (n_i / V)$ ,

含水量： $W = \pi / 6 \times \rho \times 10^{-12} \times \sum (D_i^3 \times N_i \times \Delta D_i)$ ,

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

平均值： $\bar{X} = (\sum X_i) / M$ ,

其中， $D_i$ 为*i*通道粒子的中值直径； $n_i$ 为 1 帧内*i*通道粒子的个数； $N_i$ 为单位体积内*i*通道粒子的数浓度； $N$ 为单位体积内粒子总数； $V$ 为有效取样体积； $T_{AS}$ 为飞机的真空速； $S_E$ 为仪器的有效取样面积； $T$ 为每帧谱数据的取样时间； $\bar{X}$ 为任意参数  $M$  个数据样本的平均值； $\Delta D_i$ 为*i*通道的直径间隔； $\rho$ 为水的密度。文中分析谱时涉及的直径均指各通道的中值直径，其他情况讨论的直径是指平均直径。

3 结果与分析

3.1 探测云系概述

图 1（见文后彩图）、图 2（见文后彩图）为观测期间的地球同步业务环境卫星（Geostationary

Operational Environment Satellite, 简称 GOES) 云图和雷达 PPI (平面位置显示) 图。图 1a 为 8 月 12 日 07:25 GOES 卫星云图, 云图显示一条来自西北的冷锋云系, 该云系较为稳定, 但云系中水平分布不均匀, 属于较典型的层积云系。飞机探测区域基本在锋面前部的弱云系中, 但在水平飞行观测中也对一些弱对流泡进行了穿云观测。图 1b 是 8 月 15 日 11:02 GOES 卫星云图。该云系也属于冷锋云系, 但比 8 月 12 日移动快, 并出现南北云系分离。飞机探测期间, 云系北端已经移出北京上空, 云系南端由于受到其南侧高压系统的阻挡, 移动缓慢。北京位于此云系南侧, 受其影响较小, 探测基本在云系南侧较弱的区域内进行。图 1c 是 9 月 14 日 16:01 GOES 卫星云图, 为一条暖锋云系受到东南洋面上台风的影响, 锋面前部北抬, 其强度逐渐加强, 控制范围逐渐扩大。飞机探测区域正处在较强云团的控制之下。探测期间, 该云团较稳定, 从东南向西北移动, 云团内存在较强的对流活动, 属于典型的暖锋层积云系。

图 2a 是 8 月 12 日 08:29 雷达回波图, 飞行探测区域的雷达回波强度在 20~25 dBZ 范围内。图 2b 是 8 月 15 日 11:56 雷达回波图, 探测区域的雷达回波成块状, 云体较集中, 回波强度在 15~25 dBZ 之间, 云系中的对流活动较弱。图 2c 是 9 月 14 日 14:59 雷达回波图, 飞行区域的雷达回波强度在 10~45 dBZ 范围内变化, 云体内有较强的对流云团活动。

图 3 给出了三次天气过程 08 时到次日 08 时北京地区各自动气象站 24 小时累计降水量。9 月 14

日的降水量最大, 北京汤河口站点观测到 65.3 mm 的最大降水量, 平均降水量达到 39.03 mm。8 月 15 日的降水量最小, 最大雨量也只有 2.1 mm, 部分地区没有产生降水, 平均只有 0.73 mm。8 月 12 日居中, 降水量在 7.2~27.7 mm 范围内, 平均 14.84 mm。

总之, 三个架次的飞行探测云系基本上是冷锋、暖锋面云系控制下的层积混合云系, 云系内有强弱不等的对流活动存在, 对流活动较强的 9 月 14 日产生了较大的地面降水量。这与张佃国 (2007b) 对 2003 年 8~9 月间北京及周边地区云系的分析结论基本一致。

### 3.2 云的宏观结构特征

结合飞行记录, 云宏观特征见表 3。从宏观上看, 这 3 天的层积云在垂直方向上一般是由多层云组成; 干层现象在 8 月 12 日、8 月 15 日的冷锋云系中较明显, 可能会使部分粒子在下降过程中蒸发, 造成降水量较少, 但 9 月 14 日的暖锋云系则基本不存在干层, 降水量也相应较大。云底均在 0℃ 层以下, 由于飞行管制所限, 三次观测均没有探测到云顶, 3 次探测到层积云厚度分别为 3900 m、3800 m 和 4600 m。8 月 15 日存在一深厚的较弱逆温层, 9 月 14 日从 4000~4400 m 依次出现等温层和较强逆温层。从计算含水量来看, 8 月 12 日的大值出现在 5300 m (-2℃) 左右的平飞段, 从 GA2 探测到的二维图像可知, 这个高度段内存在过冷水, 最大达到  $0.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。8 月 15 日, 在 3000 m (0℃) 以下含水量很小, 有时几乎为 0; 3000 m 以上则有大幅的增加, 呈跳跃式不均匀分布。9 月 14 日的计算含水量较大, 2800 m (0℃) 以下起伏较

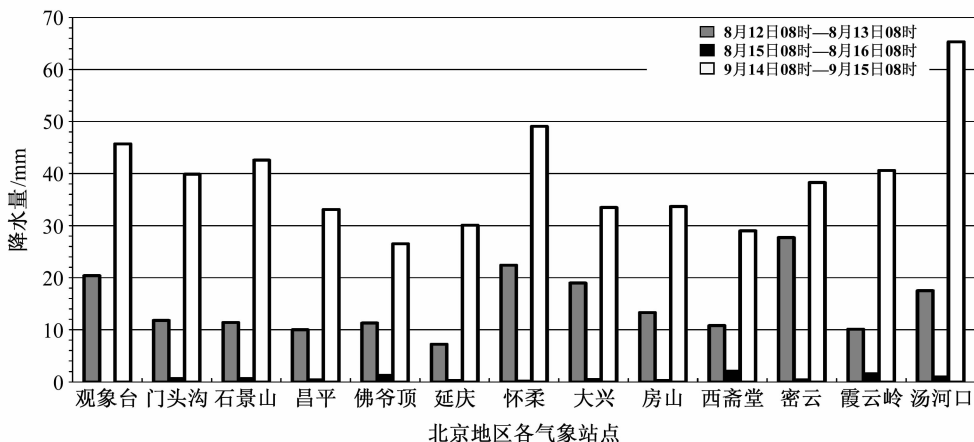


图 3 北京地区各气象站点三次天气过程 24 小时降水量分布

Fig. 3 24-h rainfall distribution at stations in Beijing region for three cases

表 3 2004 年 3 个架次探测到云的宏观特征

Table 3 Macro-characteristics for three-flight observed clouds in 2004

| 日期    | 云底高度/m | 飞行高度/m | 云内温度/℃      | 0℃层高度/m | 等温层情况                     | 干层情况 | 逆温层情况                                            |
|-------|--------|--------|-------------|---------|---------------------------|------|--------------------------------------------------|
| 8月12日 | 1900   | 5835   | 13.52~-6.05 | 4780    | 无                         | 多个干层 | 无                                                |
| 8月15日 | 2800   | 6577   | 2.97~-14.51 | 3000    | 无                         | 多个干层 | 单层 0.34℃/100 m<br>高度 3300~4100 m<br>温度-0.5~2.2℃  |
| 9月14日 | 2400   | 6937   | 2.27~-14.67 | 2850    | 高度 4000~4200 m<br>温度-4.4℃ | 无    | 单层 0.58℃/100 m<br>高度 4300~4400 m<br>温度-4.5~3.08℃ |

小, 2800 m 以上则是含水量大值区。

3.3 云微物理量统计特征

表 4 给出了三架次探测到的层积云中粒子的浓度、直径和计算含水量分布, 平均值是对探测到的云体进行垂直平均的结果。FSSP-100、GA2、GB2 探测到的浓度最大值发生在 9 月 14 日, 分别是  $318.97\text{ cm}^{-3}$ 、 $0.03\text{ cm}^{-3}$ 、 $0.0065\text{ cm}^{-3}$ , 计算含水量的最大值是  $15.10\text{ g/m}^3$ , 应为降水粒子造成的。FSSP-100 探测到的小云粒子浓度均值都只有  $10^0\text{ cm}^{-3}$  量级, 比李照荣等 (2003) 对西北地区兰州秋季小云粒子分析的均值浓度  $23\text{ cm}^{-3}$  小了一个量级, 粒子直径均值却大于兰州的  $4.6\text{ }\mu\text{m}$ 。GA2 探测到的浓度与李照荣等 (2003) 的研究结果相比也小了 1~2 个量级, 直径均值则较大。因此, 探测结果显示在北京及其周边地区的三个层积云系中, 小云粒子及大云粒子的浓度较西部地区低, 而粒子尺度则较大。GB2 探测到的平均冰雪晶浓度 ( $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{ cm}^{-3}$ ) 和直径均值 (一般小于  $1000\text{ }\mu\text{m}$ ) 的结果与山东的结论 (陈文选和王俊, 2001) 一致。张佃国 (2007b) 分析结果显示, FSSP-100 探测到北京及周边地区的粒子浓度最大值为  $10^2\text{ cm}^{-3}$  量级, 平均值为  $10^1\text{ cm}^{-3}$  量级, 比本文结果均大了一个量级; 粒子直径各指标相差不大, 这可能是由于云的个体差异造成的, 也可能与探头的测量范围不同有关, 张佃国 (2007b) 的 FSSP 的测量范围是  $0.5\sim 47\text{ }\mu\text{m}$ , 而本文的 FSSP 是  $3\sim 31\text{ }\mu\text{m}$ ; GA2 探测的结果大致相同。

8 月 12 日和 8 月 15 日的降水云都是由冷锋云系移动形成的层积云, GA2、GB2 探测到的浓度有很大不同, 8 月 12 日的 GA2 浓度 ( $10^{-2}\text{ cm}^{-3}$ ) 比 8 月 15 日大了 2 个量级, GB2 的浓度 ( $10^{-3}\text{ cm}^{-3}$ ) 大了 1 个量级, 但各探头探测到的粒子尺度则都在

表 4 2004 年 3 个架次探测到云微物理量统计表

Table 4 Microphysical-parameter statistics of three-flight observed clouds in 2004

|          |     |       | 计算含水量/<br>浓度/cm <sup>-3</sup> 直径/μm g·m <sup>-3</sup> |         |         |      |
|----------|-----|-------|-------------------------------------------------------|---------|---------|------|
| FSSP-100 | 最大值 | 8月12日 | 30.90                                                 | 31      | 0.018   |      |
|          |     | 8月15日 | 58.37                                                 | 25.14   | 0.055   |      |
|          |     | 9月14日 | 318.97                                                | 23.08   | 0.35    |      |
|          | 平均值 | 8月12日 | 1.43                                                  | 6.96    | 0.00091 |      |
|          |     | 8月15日 | 4.74                                                  | 11.46   | 0.0049  |      |
|          |     | 9月14日 | 5.52                                                  | 15.61   | 0.0084  |      |
|          | GA2 | 最大值   | 8月12日                                                 | 0.058   | 1050    | 1.25 |
|          |     |       | 8月15日                                                 | 0.00073 | 1050    | 0.52 |
|          |     |       | 9月14日                                                 | 0.03    | 1293.71 | 1.91 |
| 平均值      |     | 8月12日 | 0.0033                                                | 155.76  | 0.016   |      |
|          |     | 8月15日 | 0.000011                                              | 149.99  | 0.0021  |      |
|          |     | 9月14日 | 0.0031                                                | 413.02  | 0.13    |      |
| GB2      | 最大值 | 8月12日 | 0.0055                                                | 5450    | 13.11   |      |
|          |     | 8月15日 | 0.00031                                               | 3900    | 1.55    |      |
|          |     | 9月14日 | 0.0065                                                | 4036    | 15.10   |      |
|          | 平均值 | 8月12日 | 0.00017                                               | 576.56  | 0.226   |      |
|          |     | 8月15日 | 0.000016                                              | 761.67  | 0.044   |      |
|          |     | 9月14日 | 0.0013                                                | 1078.34 | 2.34    |      |

同一量级, 相差不大。8 月 12 日的计算含水量基本上比 8 月 15 日大一个量级。

9 月 14 日的降水云是暖锋层积云系。探测结果与上面由冷锋云系造成的层积云相比有很大不同。9 月 14 日的特征值较大, 有的量甚至大了 2 个量级。这可能是由于北京夏秋季节的暖锋云系多由台风影响带来的充沛水汽有关。

### 3.4 层积云系中的云粒子时空分布特征

云粒子浓度和大小的垂直分布、水平分布、形态和相态特征、尺度谱分布特征等在研究云辐射、降水等问题中具有很重要价值。这里,我们在分析探测的云粒子的垂直、水平分布特征的同时,结合粒子二维图像判别粒子的形态和相态,最后给出某类粒子的谱分布,这些结果可用以验证模式模拟的微物理分布特征。GB2 探头的分辨率是  $150\text{ }\mu\text{m}$ ,对粒子进行分型非常困难。因此,本文只讨论分辨率是  $30\text{ }\mu\text{m}$  的 GA2 探测到的粒子二维图像。对粒子形状的判断是根据顾震潮 (1980) 和 Pruppacher and Klett (1997) 的结论。

#### 3.4.1 冷锋层积云系

图 4 给出了 8 月 12 日 FSSP-100、GA2、GB2 探头观测到的冷锋层积云系粒子浓度和平均直径随高度和温度的分布特征,飞机探测高度范围为  $1801\sim 5835\text{ m}$ ,温度范围为  $-6.05\sim 14.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,探测时间  $06:26:45\sim 08:45:21$ 。为方便分析,图 5 给出了 8 月 12 日飞机垂直探测时不同高度的 GA2 二维图像,图像资料不够完整,只有  $5442\text{ m}$  ( $-4.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 以下的资料可用。

如图 4 所示, FSSP-100 探测的小云粒子浓度和直径的垂直分布很不均匀,浓度在  $0\sim 30\text{ cm}^{-3}$  范围变化,直径主要在  $3\sim 17\text{ }\mu\text{m}$ 。GA2 探头观测的暖云区 ( $4200\sim 4600\text{ m}$ ,  $1\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 有一个以大云滴和雨滴为主的高浓度区,  $5300\sim 5400\text{ m}$  ( $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右) 平飞段出现粒子浓度最大值。粒子直径的变化相对较小,基本在  $200\text{ }\mu\text{m}$  左右波动,与张佃国

(2007b) 的研究结果一致。由图 5 可知,从云底到  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,云中以液态云雨粒子为主。但从  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层 ( $4800\text{ m}$ ) 开始,出现了少量柱状和针状冰雪晶粒子,直到  $5400\text{ m}$  高度,云中基本为冰相粒子。图 4 中 GB2 探测到粒子的浓度、直径在云的中上部和中部(暖云区)存在大值,其他高度段内直径在  $500\text{ }\mu\text{m}$  附近变化。

图 6a (见文后彩图) 是 8 月 12 日不同探测高度内粒子的浓度谱分布,它们谱型相似,都是单峰分布,峰值浓度 ( $1.0\times 10^{-5}\text{ cm}^{-3}$ ) 和峰值直径 ( $200\text{ }\mu\text{m}$  左右) 接近,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层以下大云滴、雨滴的谱宽较宽,随着高度的增加、温度的降低,谱宽变窄。柱状和针状冰雪晶的尺寸较小,二维图像显示  $5350\sim 5442\text{ m}$  高度内 ( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右) 云层内基本没有发生冰相粒子的繁生。图 6b (见文后彩图) 给出了 Gamma 分布  $N(D)=N_0D^\mu\exp(-\Delta D)$ 、K-M (赫尔吉安-马逊) 分布  $N(D)=N_0D^2\exp(-\Delta D)$  和  $N(D)=nD^m\exp(-aD+bD^2-cD^3)$  的拟合比较情况 ( $N(D)$  是数浓度,  $D$  是粒子直径,  $N_0$ 、 $n$  是浓度参数,  $\mu$  是形状因子,  $\Delta$  是尺度参数,  $m$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  是与谱分布相关的参数,具体确定的拟合参数标示在图 6 中)。可以看出, Gamma 分布的拟合效果较好, K-M 分布拟合效果次之,  $N(D)$  适合拟合  $36.5\sim 300\text{ }\mu\text{m}$  粒子。

图 7 是 8 月 12 日探测到的过冷云、雨滴的计算含水量的分布特征。图 7a 中  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层 ( $4800\text{ m}$ ) 到  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  层左右 ( $5350\text{ m}$ ) 的过冷云、雨滴含水量的最大值  $0.13\text{ g/m}^3$ , 平均  $0.013\text{ g/m}^3$ 。图 7b 中

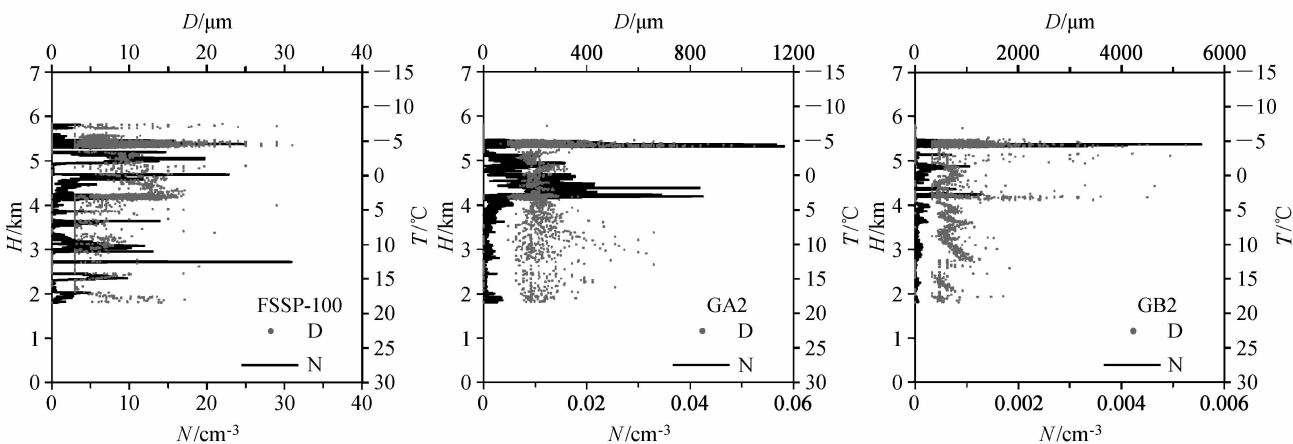


图 4 2004 年 8 月 12 日飞机上升探测的云中粒子的浓度 (黑实线) 和平均直径 (灰色点) 的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of cloud particles number concentration (black solid line) and diameter (gray dot) derived from probes FSSP-100, GA2, and GB2 during ascending flight on 12 Aug 2004

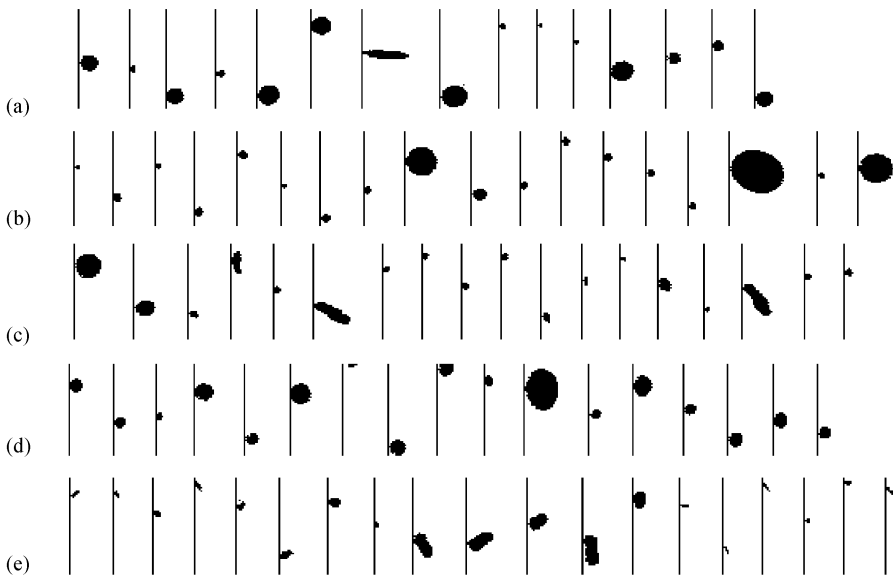


图 5 2004 年 8 月 12 日上升垂直探测时不同高度的粒子二维图像：(a) 大云滴、雨滴，1900 m，14.8℃；(b) 大云滴、雨滴，4000 m，5.2℃；(c) 大云滴、雨滴和少量柱状冰晶，4800 m，0℃；(d) 过冷大云滴、雨滴，5000 m，-1.27℃；(e) 柱状和针状冰雪晶 5400 m，-3.1℃

Fig. 5 2D images of particles sampled at different ascending heights on 12 Aug 2004: (a) Large cloud droplets and rain drops at 1900 m and 14.8℃; (b) large cloud droplets and rain drops at 4000m and 5.2℃; (c) large cloud droplets, rain drops, and a few of columnar snow crystals at 4800 m and 0℃; (d) supercooled large cloud droplets and rain drops at 5000 m and -1.27℃; (e) columnar and needle snow crystals at 5400 m and -3.1℃

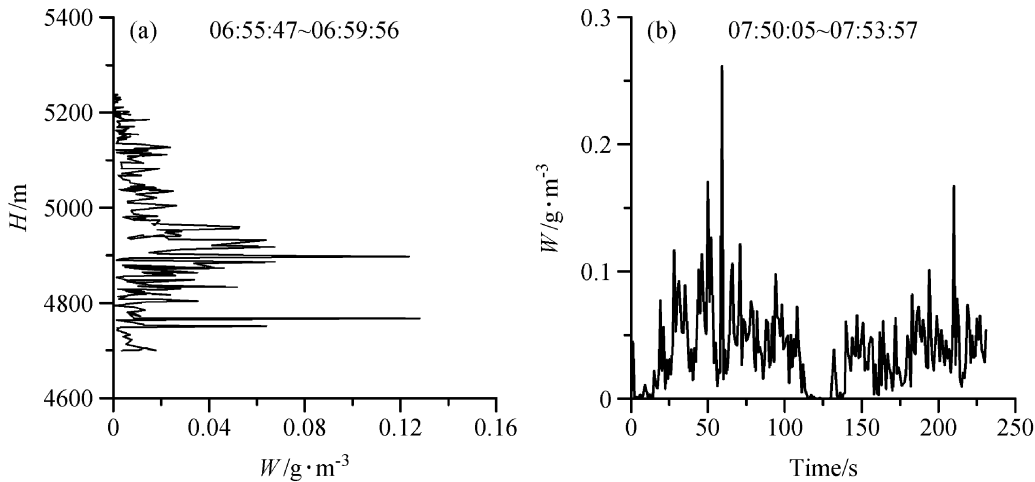


图 7 2004 年 8 月 12 日 GA2 探头测量的过冷大云滴、雨滴计算含水量分布：(a) 垂直探测时 0℃层（4800 m）到-3℃层左右（5350 m）的过冷云、雨滴含水量的分布；(b) 在 5400 m 层进行水平探测时过冷大云滴、雨滴含水量随时间的分布

Fig. 7 Water content distribution of super-cooled large cloud droplets and rain drops derived from GA2 probe on 12 Aug 2004: (a) Vertical distribution of water content of supercooled large cloud droplets and rain drops between the layers of 0℃ and -3℃; (b) time evolution of water content of supercooled large cloud droplets and rain drops at 5400 m-level probing

5400 m 平飞段过冷云、雨滴的含水量最大 0.26 g/m<sup>3</sup>，平均 0.039 g/m<sup>3</sup>。比较可知，8 月 12 日随着层积云高度的升高、温度的降低，过冷水含量有所增加。张佃国（2007b）的研究指出层积云中存在大量过

冷水。

图 8 给出了 8 月 15 日上升阶段探测到的冷锋云系层积云中粒子的垂直分布，探测高度 41～6600 m，温度-14.51～-21.53℃，时间 10:46:00～

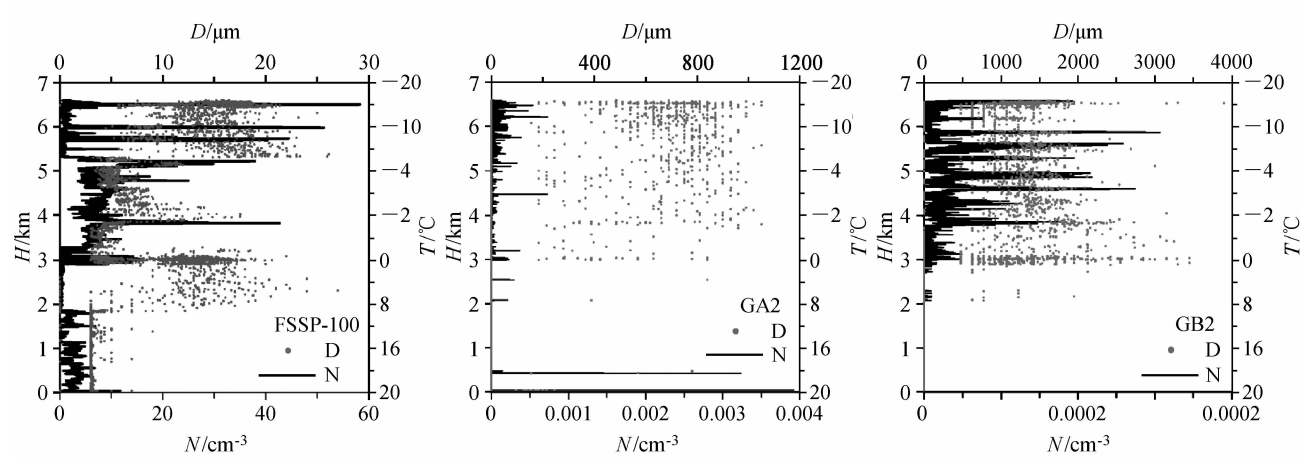


图 8 2004 年 8 月 15 日上升阶段云中粒子的浓度(黑实线)和平均直径(灰色点)的垂直分布  
Fig. 8 Vertical distribution of cloud particles number concentration (black solid line) and diameter (gray dot) derived from probes FSSP-100, GA2, and GB2 during ascending flight on 15 Aug 2004

表 5 国内 9 架次 GA2 探测的冷锋层积云系中 0℃ 层以上的微物理量比较表  
Table 5 Stratocumulus particles microphysical-parameter comparison of 9-flight GA2 data above 0℃ level induced by cold frontal systems in China

| 时间              | 地点 | $N_{\max}/\text{cm}^{-3}$ | $\bar{N}/\text{cm}^{-3}$ | $D_{\max}/\mu\text{m}$ | $\bar{D}/\mu\text{m}$ | $W_{\max}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | $\bar{W}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | $T_{\min}/^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------|----|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1988~1989 年     | 宁夏 | 0.15                      | 0.01                     | —                      | —                     | $>0.15$                               | 0.11                                 | -10                         |
| 1988~1992 年     | 山东 | 0.053                     | 0.014                    | 305.1                  | 59.3                  | 0.36                                  | 0.057                                | -5                          |
| 1992 年 6 月      | 河北 | 0.408                     | 0.05                     | 400                    | 100                   | 0.08                                  | 0.03                                 | -6.4                        |
| 2001 年 10 月     | 甘肃 | 0.01                      | 0.0016                   | 211.98                 | 127.11                | 0.012                                 | —                                    | -13                         |
| 2002 年 4 月      | 甘肃 | 0.14                      | 0.025                    | —                      | 61.3                  | 0.173                                 | $10^{-2}$ 量级                         | -10                         |
| 2003 年 7 月      | 吉林 | 0.001                     | 0.0004                   | —                      | —                     | 1.6                                   | 0.47                                 | -5                          |
| 2003 年 8 月 15 日 | 北京 | $10^{-2}$ 量级              | $10^{-3}$ 量级             | 1100                   | 200                   | 0.4                                   | 0.25                                 | -6.3                        |
| 2003 年 9 月      | 陕西 | 0.001                     | 0.0008                   | —                      | —                     | 0.1                                   | 0.04                                 | -4.2                        |
| 2004 年 8 月 12 日 | 北京 | 0.015                     | 0.003                    | 658                    | 206                   | 0.26                                  | 0.02                                 | -4.6                        |

注:  $N_{\max}$ : 冰雪晶浓度最大值;  $\bar{N}$ : 冰雪晶浓度平均值;  $D_{\max}$ : 冰雪晶直径最大值;  $\bar{D}$ : 冰雪晶直径平均值;  $W_{\max}$ : 过冷水含量最大值;  $\bar{W}$ : 过冷水含量平均值,  $T_{\min}$ : 探测时温度最小值。

11:56:03。FSSP-100 图中,层积云内 5300 m (−7℃) 以下,浓度随高度变化起伏相对较小,粒子直径主要在 5 μm 左右波动,云底 (0℃) 是直径大值区。5300 m 以上,粒子浓度的变化则较大,云内粒子的尺度也变大,直径集中在 10~20 μm。GA2 和 GB2 观测到的粒子浓度较低,随高度变化有较大的起伏,粒子直径较分散。小云滴和小冰晶比较多,可引起较强降水的大粒子则较少,这可能是只形成小雨天气过程的原因之一。图 9 (见文后彩图) 给出了 8 月 15 日平飞阶段的粒子水平分布特征。FSSP-100 图中曲线起伏不大,浓度和直径水平分布比较均匀,GA2 和 GB2 水平探测曲线则较离散,说明大粒子较少。8 月 15 日的二维图像出

现了严重的干扰,无法对云粒子进行分型和谱分析。

国内较多的是对 FSSP-100 探测到的数据进行比较(黄梦宇等,2005),对 GA2 数据的比较则很少。表 5 列出了 9 个架次 GA2 探头在冷锋层积云系中 0℃ 层以上探测到的结果,对宁夏(牛生杰等,1992)、山东(张连云和冯桂利,1997)、甘肃(李照荣等,2002,2004)、吉林(张景红等,2004)、陕西(陈争旗等,2004)、河北(杨文霞等,2005)、北京(张佃国等,2007b)以及本次 8 月 12 日的研究结果进行比较。根据二维图像,将粒子分成冰雪晶粒子和过冷水。从表 5 可知,各架次数据的差异最大有 2 个量级。河北夏季的冰雪晶粒子浓度最

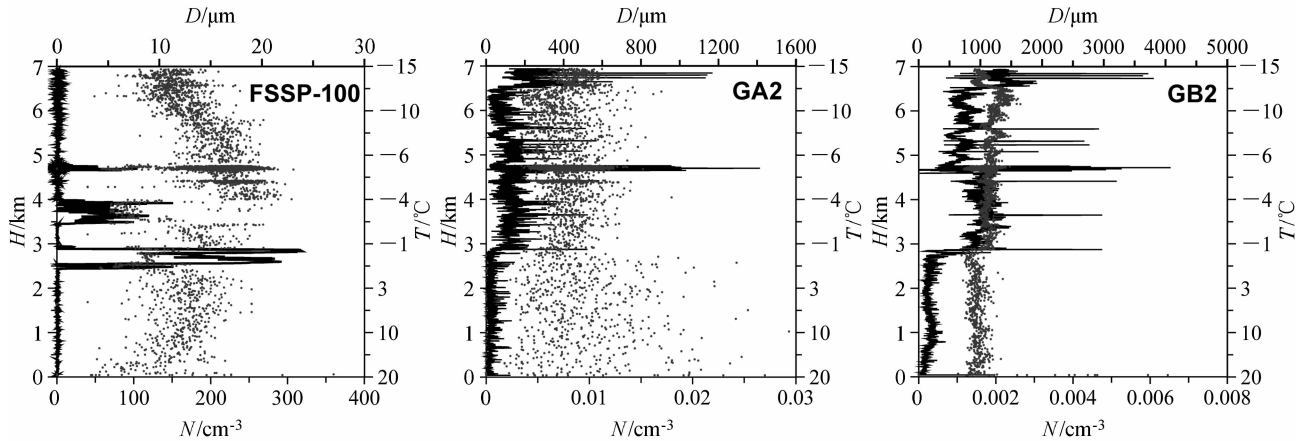


图 10 2004 年 9 月 14 日飞机探测上升阶段云中粒子的浓度(黑实线)和平均直径(灰色点)的垂直分布

Fig. 10 Vertical distribution of cloud particles number concentration (black solid line) and diameter (gray dot) derived from probes FSSP-100, GA2, and GB2 during ascending flight on 14 Sep 2004

大, 达到  $0.408 \text{ cm}^{-3}$ , 吉林和陕西的浓度最小, 浓度均值只有  $10^{-4}$  量级。北京地区的冰雪晶浓度居中, 粒子直径却是 7 个地区最大的, 直径均值最小的甘肃(2002 年 4 月)只有  $61.3 \mu\text{m}$ 。吉林夏季的过冷水比较丰富, 含量达到  $1.6 \text{ g/m}^3$ , 甘肃秋季(2001 年 10 月)却只有  $0.012 \text{ g/m}^3$ , 北京地区的过冷水含量也有大值出现, 因为云系微物理结构的不同造成的变化较大。

### 3.4.2 暖锋层积云系

图 10 给出了 9 月 14 日飞机探测上升阶段暖锋云系中层积云粒子的垂直分布, 探测高度范围为  $41 \sim 6937 \text{ m}$ , 温度范围为  $-14.67 \sim 18.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 探测时间  $15:47:29 \sim 17:47:02$ 。FSSP-100 探测到粒子直径基本在  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  之间变化, 随高度增加先变大后减小; 浓度的大值区在云底 ( $2400 \sim 2800 \text{ m}$ ,  $0 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和云的中下部 ( $3500 \sim 4000 \text{ m}$  即  $-4 \sim -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 其他高度内粒子浓度变化很小, 大约  $10 \text{ cm}^{-3}$ , 说明在浓度的两个大值区存在较强对流区, 而且对流区内的粒子浓度最大值比区外大了有  $1 \sim 2$  个量级, 但区内粒子尺度则相对较小。  $4000 \sim 4400 \text{ m}$  依次出现等温层和较强逆温层, 而在  $4000 \text{ m}$  高度处 ( $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 出现了直径小于  $10 \mu\text{m}$  粒子浓度的累积, 这可能是由于较强逆温层的存在阻挡了粒子垂直输送。云区内 GA2 和 GB2 的浓度、直径随高度升高均起伏较小, 浓度分别在  $0.0031 \text{ cm}^{-3}$ 、 $0.0013 \text{ cm}^{-3}$  左右波动, 直径分别在  $400 \mu\text{m}$ 、 $1100 \mu\text{m}$  附近起伏, 其中 GB2 直径在小幅波动中逐渐增大;  $6500 \text{ m}$

以上, GA2 和 GB2 的浓度都有所增加, GB2 的直径则减小至  $950 \mu\text{m}$  左右, 这可能是因为随着高度的进一步升高, 温度越来越低, 冰雪晶发生攀附、粘连的几率愈来愈小, 从而引起冰晶的数量增加, 尺寸变小。与 FSSP-100 图相比, GA2、GB2 图中两个对流区高度处均未出现浓度和直径的明显变化。平飞期间 ( $4700 \text{ m}$ ,  $-6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 也没有出现高浓度区。

图 11 给出了上升阶段不同高度 GA2 探测到的粒子二维图像。9 月 14 日的二维图像时间为  $15:47:29 \sim 16:05:23$ , 相应高度  $42 \text{ m}$  ( $18.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )  $\sim 4387 \text{ m}$  ( $-5.70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )。二维图像探测结果显示, 粒子尺度较大, GA2 探测到的粒子较少, 在  $0 \sim -5.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度区间, 霰粒、结凇的冰雪粒子和冰雪晶聚合体是主要的冰相粒子, 针状、柱状冰晶和过冷云、雨滴则较少, 且零星地分布在负温云区。

图 12a (见文后彩图) 是 GA2 探测到的主要粒子的平均浓度谱分布, 它们都是单峰结构, 谱型相似, 谱宽相同, 都属于宽谱型,  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  层以上冰相粒子的浓度较大, 可能直接导致了这天较大的降水。图 12b (见文后彩图) 为 Gamma 分布、K-M 分布和  $N(D) = nD^m \exp(-aD + bD^2 - cD^3)$  拟合分布情况, 在拟合  $36.5 \sim 600 \mu\text{m}$  云雨滴时, 三种函数拟合效果均较好, 大于  $600 \mu\text{m}$  粒子拟合  $N(D) = nD^m \exp(-aD + bD^2 - cD^3)$  效果较好, Gamma 分布和 K-M 分布拟合效果较差 (具体确定的拟合参数标示在图 12 中)。

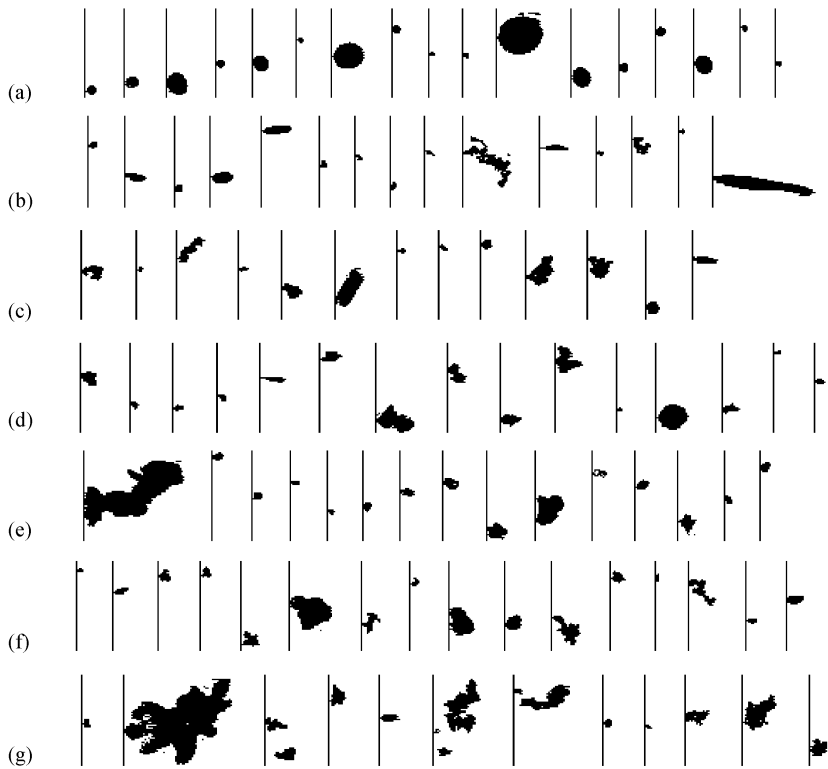


图 11 2004 年 9 月 14 日垂直飞行时 GA2 探测的二维图像: (a) 2400 m、2.15 °C 的云、雨滴; (b) 2800 m、0 °C 的针状冰晶; (c) 3850 m、-3 °C 的柱状冰晶; (d) 3870 m、-3.3 °C 的过冷云、雨滴; (e) 3900 m、-3.6 °C 的冰雪晶聚合体; (f) 4000 m、-4.4 °C 的霰; (g) 4350 m、-5 °C 的结凇冰雪粒子

Fig. 11 Two-dimensional images of particles at different ascent heights on 14 Sep 2004: (a) Cloud drops and rain drops at 2400 m and 2.15 °C; (b) needle crystal at 2800 m and 0 °C; (c) columnar crystal at 3850 m and -3 °C; (d) supercooled cloud drops and rain drops at 3870 m and -3.3 °C; (e) large aggregates at 3900 m and -3.6 °C; (f) graupel at 4000 m and -4.4 °C; (g) riming particles at 4350 m and -5 °C

表 6 国内 4 架次 GA2 探测到暖锋云系层积云中 0 °C 层以上的微物理量比较表

Table 6 Stratocumulus particles microphysical-parameter comparison of four-flight GA2 data above 0°C level induced by warm frontal system in China

| 时间              | 地点 | $N_{\max}/\text{cm}^{-3}$ | $\bar{N}/\text{cm}^{-3}$ | $D_{\max}/\mu\text{m}$ | $\bar{D}/\mu\text{m}$ | $W_{\max}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | $\bar{W}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | $T_{\min}/^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------|----|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1991 年 5 月      | 河北 | 0.06                      | 0.02                     | —                      | —                     | 0.117                                 | 0.06                                 | -5                          |
| 1995 年 6 月      | 辽宁 | 0.006                     | 0.003                    | 180                    | 60                    | 0.004                                 | 0.002                                | —                           |
| 2002 年 9 月      | 甘肃 | 0.025                     | 0.006                    | 291                    | 116                   | 0.26                                  | —                                    | -3                          |
| 2004 年 9 月 14 日 | 北京 | 0.0098                    | 0.0022                   | 958                    | 427                   | —                                     | —                                    | -5.7                        |

注:  $N_{\max}$ : 冰雪晶浓度最大值;  $\bar{N}$ : 冰雪晶浓度平均值;  $D_{\max}$ : 冰雪晶直径最大值;  $\bar{D}$ : 冰雪晶直径平均值;  $W_{\max}$ : 过冷水含量最大值;  $\bar{W}$ : 过冷水含量平均值,  $T_{\min}$ : 探测时温度最小值。

表 6 列出了国内 4 架次飞行期间 GA2 在暖锋层积云系的 0 °C 层以上探测到的数据, 对辽宁 (李英伟和王永亮, 1999)、甘肃李照荣 (2003)、河北杨文霞等 (2005) 以及本次 9 月 14 日北京的结果进行了比较, 列表依据和说明同表 5。从表 6 看出, 河北的冰雪晶粒子浓度最大, 达到  $0.06\text{ cm}^{-3}$ , 比最小的辽宁大了 10 倍。北京 9 月 14 日的粒子直径

958  $\mu\text{m}$  是最大的, 而过冷水含量较低。河北的过冷水含量最大达到  $0.117\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与表 5 相比较, 冷锋云系的过冷水含量基本上大于暖锋云系。

4 结论

本文对 2004 年 8、9 月期间我国北京及周边地区三次降水云的飞机探测结果进行了初步分析, 有

关结果总结如下:

(1) 三个降水云基本上是锋面云系控制下的层积云, 与 2003 年 8 月的探测结果一致。本文的三个层积云系内有分层, 云底高度一般低于 3000 m, 均为混合云。暖锋层积云系(9 月 14 日)与冷锋层积云系(8 月 12 日、8 月 15 日)相比较, 9 月 14 日特征值较大, FSSP-100、GA2、GB2 探测到粒子浓度的最大值分别是  $318.97 \text{ cm}^{-3}$ 、 $0.03 \text{ cm}^{-3}$ 、 $0.0065 \text{ cm}^{-3}$ , 24 小时降水量也最大。

(2) 冷锋层积云系(8 月 12 日和 8 月 15 日)内存在多个干层。8 月 12 日粒子浓度的垂直分布不均匀, 直径变化较小, 3 个探头的探测结果分别是以  $3\sim 17 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$  和  $500 \mu\text{m}$  的粒子为主, 过冷水含量随温度降低而有所增加。8 月 15 日的层积云内有逆温, 特征值基本上比 8 月 12 日小, 粒子垂直分布起伏较大, 水平方向小粒子分布较均匀, 大粒子则起伏明显。

(3) 暖锋层积云系(9 月 14 日)内无干层, 等温层与逆温层相连, 较低的等温层底( $-4^\circ\text{C}$ )出现  $10 \mu\text{m}$  小粒子的累积。垂直方向上, 由于有强对流区的存在, 造成小粒子的分布在对流区浓度大、尺度小, 区外则反之, 而大粒子的分布比较均匀, 直径在  $400 \mu\text{m}$  和  $1100 \mu\text{m}$  左右。水平方向的起伏不大。

(4) 与我国北方地区 13 架次飞行探测结果比较, 2003 年、2004 年北京及周边地区三个架次的冰雪晶粒子直径最大, 浓度居中, 过冷水含量因云系结构不同而变化较大。冷锋云系的过冷水含量基本上大于暖锋云系。

(5) GA2 谱分布以单峰结构为主, 也存在双峰结构(9 月 14 日 $-14^\circ\text{C}$ 层图略), 8 月 12 日和 9 月 14 日的峰值直径均在  $200 \mu\text{m}$  左右, 峰值浓度大多在  $1.0\times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ , 8 月 15 日在  $400\sim 800 \mu\text{m}$  之间变化, 峰值浓度较低。9 月 14 日的浓度较高, 谱宽较宽。 $0^\circ\text{C}$ 层以下, 大粒子的浓度随着高度的升高而增加, 各架次  $0^\circ\text{C}$ 层以上谱型相近。8 月 12 日 Gamma 分布的拟合效果较好, 9 月 14 日适合用  $N(D)=nD^m \exp(-aD+bD^2-cD^3)$  拟合。

## 参考文献 (References)

陈保国, 樊鹏, 雷崇刚, 等. 2005. 2002 年秋季陕北地区一次锋面

- 云系综合探测分析 [J]. 气象, 31 (1): 45-49. Chen Baoguo, Fan Peng, Lei Chongdian, et al. 2005. An observational study of cold front cloud system in the northern Shaanxi province in the Autumn 2002 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (1): 45-49.
- 陈文选, 王俊. 2001. 黄淮气旋降水性层状云系微物理特征的综合分析 [J]. 气象, 27 (10): 13-19. Chen Wenxuan, Wang Jun. 2001. Analysis the microphysical characteristics of precipitable stratiform clouds of Huang-Huai cyclone [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (10): 13-19.
- 陈争旗, 陈保国, 许新田, 等. 2004. 西北地区一次联合探测层状云系云物理特征分析 [J]. 陕西气象, 6: 4-7. Chen Zhengqi, Chen Baoguo, Xu Xintian, et al. 2004. Physical features of stratiform clouds through a combining probing over the northwest of China [J]. Journal of Shaanxi Meteorology (in Chinese), 6: 4-7.
- 范烨, 郭学良, 付丹红, 等. 2007. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 49-62. Fan Ye, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2007. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 49-62.
- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 3-80. Gu Zhenchao. 1980. The Physical Basis of Cloud and Precipitation (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 3-80.
- 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 2005. 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, 28 (3): 360-367. Huang Mengyu, Zhao Chunsheng, Zhou Guangqiang, et al. 2005. Stratus cloud microphysical characters over North China region and the relationship between aerosols and clouds [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (3): 360-367.
- 李念童, 李铁林, 郑宏伟. 2001. 河南省飞机人工增雨试验方案设计 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 201-205. Li Niantong, Li Tielin, Zheng Hongwei. 2001. Design of the scheme for aircraft precipitation enhancement experiment in Henan Province [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (Suppl.): 201-205.
- 李英伟, 王永亮. 1999. 一次降水过程的云微物理结构探测 [J]. 辽宁气象, 3: 38-45. Li Yingwei, Wang Yongliang. 1999. An observation of a precipitation microphysical process [J]. Liaoning Meteorology (in Chinese), 3: 38-45.
- 李照荣, 李宝梓, 庞朝云, 等. 2002. 甘肃省秋季层状云冰雪晶粒子特征个例分析 [J]. 甘肃气象, 20 (3): 21-23. Li Zhaorong, Li Baozi, Pang Chaoyun, et al. 2002. The characteristic of ice-snow crystals of stratiform-type cloud in autumn in Gansu Province [J]. Gansu Meteorology (in Chinese), 20 (3): 21-23.
- 李照荣, 陈添宇, 杨珍贵, 等. 2003. 秋季冷云结构及人工增雨可播性区的评估 [J]. 甘肃气象, 21 (1): 31-34. Li Zhaorong, Chen Tianyu, Yang Zhengui, et al. 2003. Cold cloud structure and es-

- timation seeding-areas of precipitation enhancement operation in autumn [J]. *Gansu Meteorology* (in Chinese), 21 (1): 31–34.
- 李照荣, 李荣庆, 李宝梓. 2003. 兰州地区秋季层状云垂直微物理结构特征分析 [J]. *高原气象*, 22 (6): 583–589. Li Zhaorong, Li Rongqing, Li Baozi. 2003. Analyses on vertical microphysical characteristics of autumn stratiform cloud in Lanzhou region [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 22 (6): 584–589.
- 李照荣, 李荣庆, 陈添宇, 等. 2004. 春季冷锋天气过程层状云微物理结构个例分析 [J]. *干旱气象*, 22 (4): 40–55. Li Zhaorong, Li Rongqing, Chen Tianyu, et al. 2004. A case study on microphysical structure of stratus during a cold front in spring [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 22 (4): 40–55.
- 牛生杰, 马铁汉, 管月娥, 等. 1992. 宁夏夏季降水性层状云微结构观测分析 [J]. *高原气象*, 11 (3): 241–248. Niu Shengjie, Ma Tiehan, Guan Yuee, et al. 1992. Observation analysis of the microstructures of precipitation sheet clouds in summer over Ningxia [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 11 (3): 241–248.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1997. *Microphysics of Clouds And Precipitation* [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 45–47.
- Stith J L, Dye J E, Bansemmer A, et al. 2002. Microphysical observations of tropical clouds [J]. *J. Appl. Meteor.*, 41: 97–117.
- Tremblay A, Vaillancourt P A, Cober S G, et al. 2003. Improvements of a mixed-phase cloud scheme using aircraft observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 672–686.
- 王谦, 游来光, 胡志晋. 1987. 新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究个例的观测结果与分析 [J]. *气象学报*, 45 (1): 3–12. Wang Qian, You Laiguang, Hu Zhijin. 1987. The study on the winter stratocumulus cloud over Urumqi, Xinjiang, China structure and evolution [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 45 (1): 3–12.
- 杨文霞, 牛生杰, 魏俊国, 等. 2005. 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*, 24 (1): 84–90. Yang Wenxia, Niu Shengjie, Wei Junguo, et al. 2005. Airborne observation for microphysical structure of precipitation system of stratiform cloud in Hebei Province [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (1): 85–90.
- 姚展予, 濮江平, 刘卫国, 等. 2004. 飞机探测云物理数据集的建立和应用 [J]. *应用气象学报*, 15 (增刊): 68–74. Yao Zhanyu, Pu Jiangping, Liu Weiguo, et al. 2004. Foundation and application of cloud physics data set via aero-detection [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 15 (Suppl.): 68–74.
- 张佃国, 郭学良, 肖稳安. 2007a. 北京及周边地区 2003 年夏秋季气溶胶和云滴分布特征 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (3): 402–410. Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Xiao Wenan. 2007a. Distributive characters of aerosols and cloud droplets in the summer and autumn of 2003 over Beijing and its peripheral areas [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 30 (3): 402–410.
- 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2007b. 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*, 31 (4): 597–610. Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2007b. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during August–September 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (4): 597–610.
- 张景红, 郑矫恒, 谷淑芳. 2004. 一次典型积层混合云降水的综合探测分析 [J]. *吉林气象*, 3: 6–36. Zhang Jinghong, Zheng Jiaoheng, Gu Shufang. 2004. The comprehensive observation analyses on a typical stratiform and cumulous mixed precipitating cloud [J]. *Jilin Meteorology* (in Chinese), 3: 6–8.
- 张连云, 冯桂利. 1997. 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*, 23 (5): 3–7. Zhang Lianyun, Feng Guili. 1997. Study of the microphysical structure and seedable conditions of stratiform clouds in spring and fall [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 23 (5): 3–7.

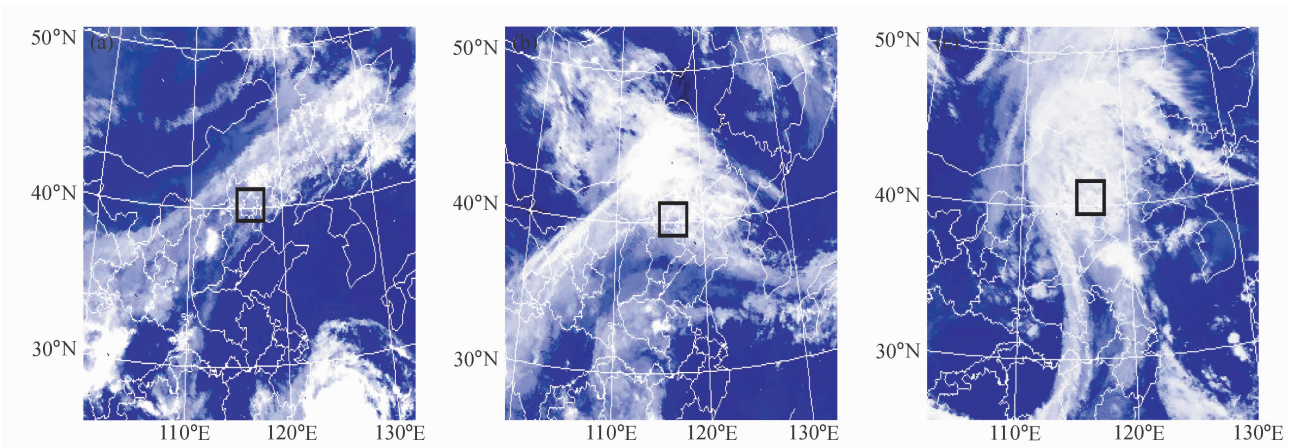


图 1 2004 年 3 个架次飞行观测期间的 GOES 卫星云图：(a) 8 月 12 日 07:25；(b) 8 月 15 日 11:02；(c) 9 月 14 日 16:01。黑框内为北京及周边地区

Fig. 1 Three GOES cloud images during measuring periods in 2004: (a) 0725 BT (Beijing time) on Aug 12; (b) 1102 BT on Aug 15; (c) 1601 BT on Sep 14. Black rectangles denote Beijing and its surrounding areas

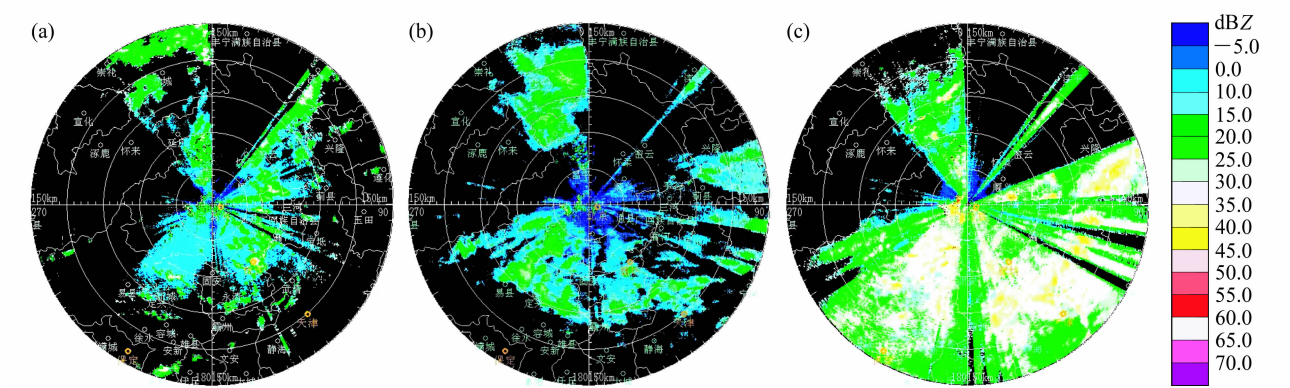


图 2 2004 年 3 个架次飞行观测期间的雷达 PPI 图：(a) 8 月 12 日 08:29；(b) 8 月 15 日 11:56；(c) 9 月 14 日 14:59

Fig. 2 Radar echo distributions on the PPI (Plan Position Indicator) during three measuring periods in 2004: (a) 0829 BT on Aug 12; (b) 1156 BT on Aug 15; (c) 1459 BT on Sep 14

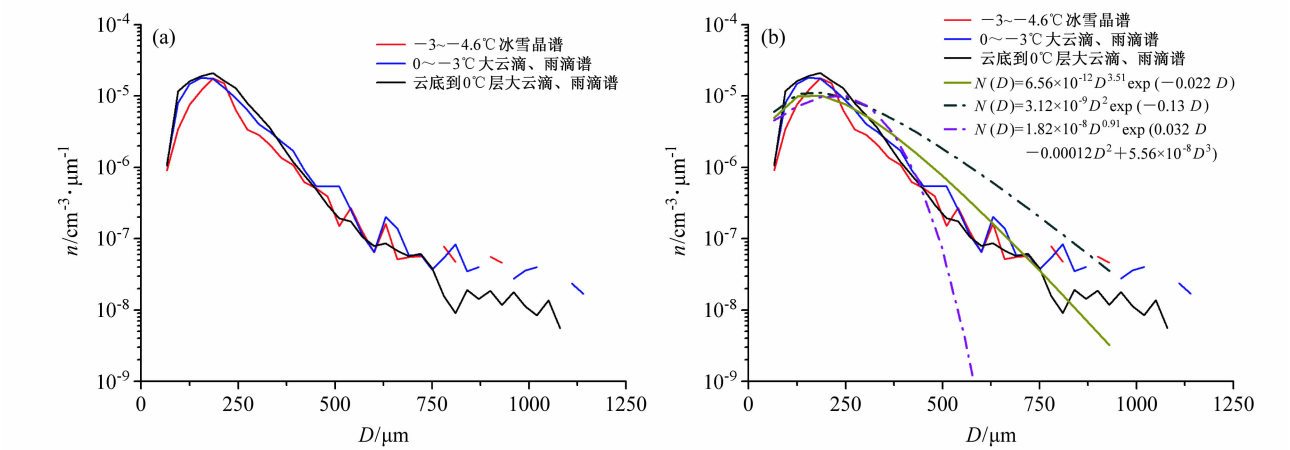


图 6 2004 年 8 月 12 日上升飞行时 GA2 探测的不同高度的平均粒子谱分布 (a) 及拟合 (b)

Fig. 6 (a) Mean particle size distributions and (b) fitting at different ascending heights derived from GA2 on 12 Aug 2004

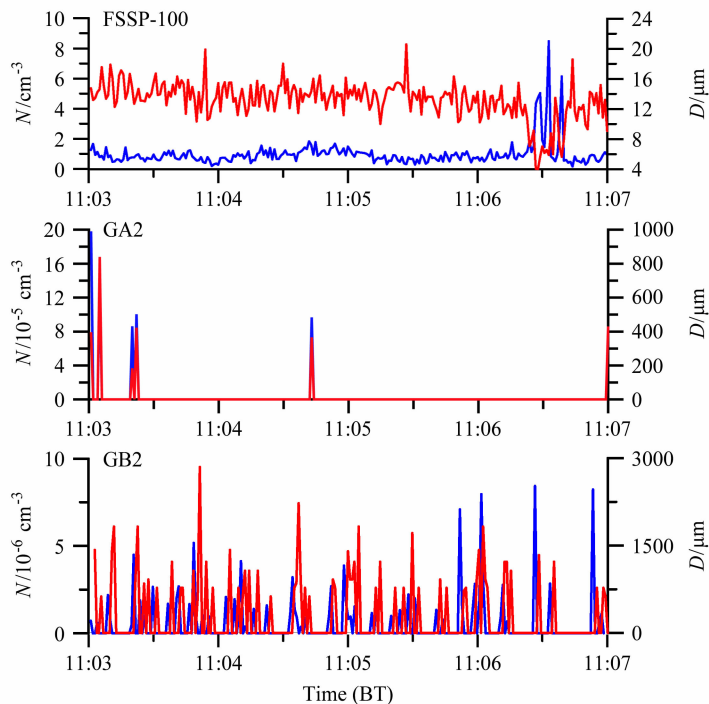


图 9 2004 年 8 月 15 日 3000 m 平飞段 (0 °C, 水平距离 13 km) 240 秒粒子浓度 (蓝线) 和直径 (红线) 的时间演变图

Fig. 9 Time evolution of cloud particle number concentration (blue line) and diameter (red line) at 3000 m (0 °C, horizontal distance 13 km) during horizontal flight on 15 Aug 2004

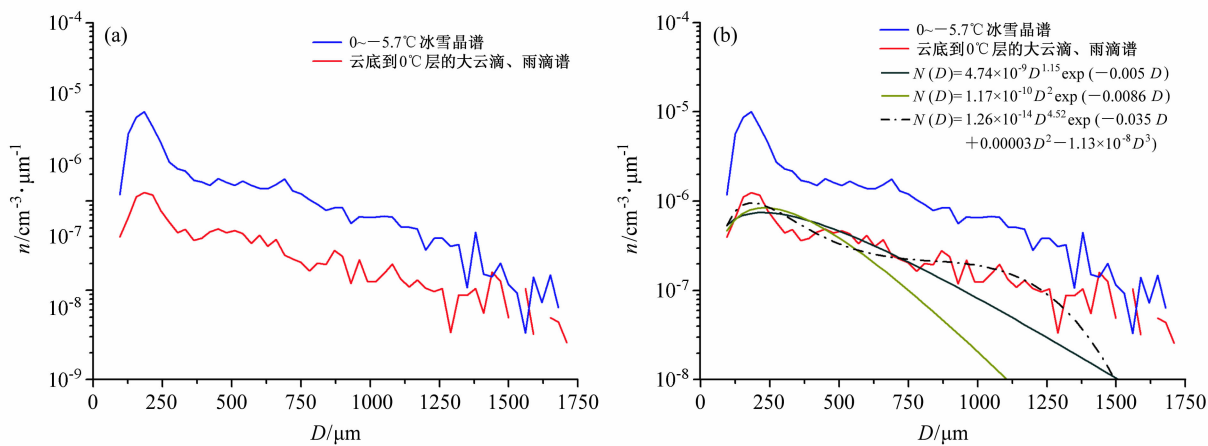


图 12 2004 年 9 月 14 日 GA2 垂直探测的粒子平均浓度谱分布 (a) 及拟合 (b)。

Fig. 12 (a) Mean particle size distributions and (b) fitting at different ascending heights derived from GA2 on 14 Sep 2004