

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

范 焱¹ 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云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

2 北京人工影响天气办公室, 北京 100089

摘 要 对 2004 年的 8、9 月间机载 PMS 系统在北京及周边地区进行的不同天气状况下的 8 次气溶胶飞行观测资料进行了分析。结果表明, 此观测期间, 近地层以轻雾、霾为主。气溶胶浓度最大值的量级为 $10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。阴天状况下气溶胶浓度最大, 可达 $12\,169 \text{ cm}^{-3}$; 晴空时最小, 为 783 cm^{-3} 。平均气溶胶浓度为 $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$; 直径最大值主要集中在 $0.28 \sim 0.47 \mu\text{m}$, 平均值集中在 $0.21 \sim 0.31 \mu\text{m}$; 风速较小的晴天和阴天都有可能使气溶胶浓度出现高值。大气有逆温层存在时, 逆温层底有气溶胶粒子的明显累积。气溶胶粒子浓度谱为单峰分布。

关键词 气溶胶 观测 机载 PMS 系统

文章编号 1006-9585 (2007) 01-0049-14 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

Observational Studies on Aerosol Distribution During August to September in 2004 over Beijing and Its Surrounding Areas

FAN Ye¹, 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*

Abstract The eight-flight aerosol data sampled with Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe (PCASP) and FSSP-100 probes of an airborne Particle Measurement System (PMS) in different atmospheric conditions during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas were analyzed. The results show that due to the important effect of fog and haze near the surface, the maximum number concentration of aerosol changed from $10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$. The maximum number concentration could reach as high as $12\,169 \text{ cm}^{-3}$ in the cloudy condition while in the clean condition it could only be 783 cm^{-3} . The order of the mean number concentration was $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$. The maximum diameter of aerosol particles was primarily distributed around $0.29 \sim 0.47 \mu\text{m}$ and the mean diameter was around $0.21 \sim 0.31 \mu\text{m}$. The number concentration of aerosol particles could be high in both clean and cloudy condition when wind was weak. In the temperature inversion condition, the distinct accumulation zone could be found under the inversion layers. The size distribution of aerosol follows unimodal distribution.

Key words aerosol, measurement, air borne Particle Measurement System

收稿日期 2005-11-21 收到, 2006-11-27 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333033、40575003, 国家科技支撑计划课题 2006BAC12B03 和中国科学院知识创新项目 KZCX3-SW-225

作者简介 范焱, 女, 1976 年出生, 硕士, 主要从事云降水物理与人工影响天气研究。E-mail: fy763@sohu.com

1 引言

气溶胶的分布特征在云、降水形成及气候、环境领域都具有非常重要的作用,是影响气候变化和大气空气质量的重要因子。一方面,随着工业化的发展和人类活动的影响,由工业、汽车排放及自然生态环境破坏产生的人为气溶胶,通过改变大气辐射平衡与空气组成,已经对地球(区域)气候与环境产生了巨大的影响。另一方面,气溶胶在大气中可以成为云凝结核(CCN)和冰核(IN),是云与降水形成的重要组成部分。因此,目前有关大气中气溶胶的分布状况、演变特征在气候、环境与大气水资源领域都受到广泛的关注。

对大气气溶胶的直接观测是一种广泛使用的研究手段。由美国 PMS 公司生产的粒子测量系统 PMS (Particle Measurement System) 的气溶胶探头(PCASP)是目前常用的机载气溶胶探测仪器之一,得到了较为广泛的使用^[1~4]。该仪器搭载在飞机上,可直接、连续地探测大气中气溶胶直径和浓度的时空分布。

国外利用 PMS 仪器对大气气溶胶的理化特性进行研究开始于 20 世纪 70 年代后期。在美国维斯康星州的一次积云探测中^[5],PCASP 探测到气溶胶的最大浓度是 $1\,800\text{ cm}^{-3}$ (近地面处),均立方根直径在 $0.25\sim 0.70\text{ }\mu\text{m}$ 之间变化,5 000~7 000 m 内也存在一个浓度高值区,而且此高度段内的谱分布与云底不同。Twohy 等^[6]指出大多数气溶胶的直径小于 $0.20\text{ }\mu\text{m}$ 。1993 年夏天的两次气溶胶探测中,Gultepe 等^[7]发现气溶胶浓度相差了 5~6 倍,浓度最大值出现在云海之上。

在 20 世纪 80~90 年代,我国科研人员曾利用 PMS 的气溶胶探头对一些地区进行了飞行探测研究。如谷福印等^[8]在 1982 年 4 月期间,对北京地区的气溶胶进行了探测,发现粒子谱符合幂函数分布,与 Junge 谱系数有明显差异。何绍钦^[9]于 1982 年夏季在西安进行了一次晴空探测,结果表明,近地层粒子谱满足 Junge 分布。杨军等^[10]对辽宁 1996、1997 年春夏季的气溶胶观测表明,气溶胶粒子谱受不同形成机制的影响表现出多峰分布特征。尽管这些研究对了解我国部分地区气

溶胶的特性有重要的帮助,但也存在一些明显的不足,主要表现在:探测次数明显不足,没有进行系统的探测;气溶胶和大气的状况密切相关,应针对不同的大气状况(如晴天、阴天,大气逆温、污染状况等)进行系统探测研究。特别是对北京地区目前大气气溶胶的直接飞机探测研究很少^[11~13]。北京近几年城市建设和汽车发展迅速,大气气溶胶的分布状况是直接关系到研究北京地区云、降水、环境及区域气候变化的重要问题。

2004 年 8、9 月间北京市人工影响天气办公室进行了 12 架次的飞行观测。本文对其中的 8 个架次的气溶胶观测进行了分析,目的在于了解北京及周边地区大气背景气溶胶的分布特征,对该地区云、降水及人工影响天气等领域的研究有重要意义。

2 飞机探测与分析方法

2.1 探测设备

探测飞机安装的仪器设备包括:GPS 卫星定位系统、机载粒子探测设备及温度、露点、高度、空速等云中宏观参数传感器(见表 1)。其中,PCASP-100X 各通道的分辨率不同,从第 1 通道到第 15 通道,分辨率从 $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐增加到 $0.50\text{ }\mu\text{m}$;FSSP-100 的分辨率是 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 。表 1 中探测范围的直径是第 1 和第 15 通道的中值直径。各探测仪器每秒采样 1 次。

2.2 探测飞行概况

2004 年 8、9 月间,在北京及周边地区进行的气溶胶探测飞行中,有 8 次取得了较好的观测资料。资料显示,飞机均是从位于北京北部的沙河机场起飞开始探测。该机场的西部、北部是燕山山脉,南部是华北平原,距北京市区约 30 km。表 2 是 8 次飞行探测概况。由此表可知,最高飞行高度达 7 136 m,最低温度 $-22.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最长飞行时间 122 min,最短只有 32 min。9 月 12 日的探测飞行是在中午进行的,其余飞行观测基本集中在上午。飞行区域主要在北京及周边地区,往东南到了天津,往西北到了张家口。9 月 14 日的飞行线路大致是爬升—平飞—略微下降—爬升;其余都是爬升—平飞或者平绕飞—爬升,时间间隔均是几分钟。

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 卫星定位系统	—	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
PCASP—100X 被动腔式气溶胶粒子谱探头	0.11~2.75 μm 共 15 个通道	右翼下方	探测气溶胶粒子
FSSP—100 前向散射滴谱探头	3~31 μm 共 15 个通道	右翼下方	探测小云粒子
铂电阻，反流式温度计	—100~100 ℃	右翼下方	获取环境温度
G. B. 1011B 露点温度计	—75~50 ℃	左翼下方	获取环境露点温度
542K2 高度空速转换盒	0~15 000 m, 140~650 km·h ⁻¹	机舱前部下方	获取探测平台高度及移动速度

表 2 飞行概况
Table 2 Flights survey

日期	时间 (LST)	区域	高度/ m	温度/℃
2004-08-27	11:04:01~11:49:32	昌平沙河机场上空	575~3 737	2.47~22.52
2004-08-29	10:42:00~11:14:50	昌平沙河机场上空	58~2 377	6.22~28.52
2004-09-04	10:39:44~12:12:16	北京—廊坊—天津	317~4 583	—3.75~20.52
2004-09-05	10:23:10~11:36:01	北京—天津宝坻	41~3 658	—0.69~33.14
2004-09-07	10:20:51~11:22:15	北京—廊坊	44~3 784	—1.73~32.98
2004-09-12	11:04:18~13:06:14	昌平—海淀—石景山—丰台	43~7 136	—22.19~25.09
2004-09-14	09:37:37~10:54:45	昌平—怀柔—张家口	43~7 014	—17.94~21.32
2004-09-16	11:16:42~12:20:26	昌平沙河机场上空	41~3 855	0.45~21.92

2.3 统计方法

本文中各微物理量的计算方法如下^[14]：

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

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

浓度： $N = \sum (n(D_i) / V)$ ，

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

平均值： $\bar{X} = (\sum X_i) / M$ ，

起伏值： $\sigma / \bar{X} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X})^2}{M - 1}} / \bar{X}$ ，

极值差： $(X_{\max} - X_{\min}) / \bar{X}$ ，

其中， D_i 为*i*通道粒子的中值直径； $n(D_i)$ 为1帧内*i*通道粒子的个数； $N(D_i)$ 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； σ 为离差； $X_{\max}$ 为任意参数的最大值； $X_{\min}$ 为任意参数的最

小值。

本文以飞机在上升飞行阶段探测到的气溶胶分布特征作为主要研究对象，在分析滴谱时涉及的直径是指各通道的中值直径，其他情况下讨论的直径是指平均直径。

3 结果与分析

根据沙河机场气象台提供的场站记录，表3给出了8个架次起飞前的地面观测情况。由此表可知，水平能见度在2 500~6 000 m之间，垂直能见度在2~4级范围内。地面空气状况以轻雾、霾为主。8月29日、9月4日、9月7日和9月12日基本为晴天探测，其余探测都属于有云天气探测。除8月29日、9月7日地面风速超过5 m·s⁻¹，其他都在1~2 m·s⁻¹的范围。9月4日、9月5日和9月14日的地面风向是偏南风，其他5个架次的地面风向为西北风。

3.1 统计特征

表4给出了8个架次探测的气溶胶/小云粒子浓度及尺度统计结果。从PCASP气溶胶探头探测

表 3 观测期间的大气状况统计表
Table 3 Atmospheric condition in experimental days

日期	水平能见度/m	垂直能见度/m	近地层状况	天气类型	风向	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
2004-08-27	5 000	2	雾、霾	多云 (Sc), 弱不稳定	西北	2
2004-08-29	4 000	4	轻雾	晴	西北	5
2004-09-04	6 000	3	轻雾、霾	晴, 少云 (Ci), 弱逆温	南	1
2004-09-05	4 500	3	轻雾	云 (St), 小雨	西南	1
2004-09-07	4 000	4	轻雾、霾	晴	西北	6
2004-09-12	5 000	3	轻雾、霾	晴, 较强逆温	西北	2
2004-09-14	2 500	3	轻雾、霾	多云 (St), 弱不稳定	西南	2
2004-09-16	3 000	3	轻雾	云 (Sc, Cu), 强逆温	西北	2

注: 层积云 Sc; 卷云 Ci; 层云 St; 积云 Cu

表 4 气溶胶/小云粒子的浓度/直径统计表
Table 4 Statistical results of number concentration and diameter of aerosol and small cloud particle

日期	PCASP 浓度/ cm^{-3}		PCASP 直径/ μm		FSSP-100 浓度/ cm^{-3}		FSSP-100 直径/ μm	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
2004-08-27	12 169	2 894	0.47	0.31	297.6	16.2	7.2	3.7
2004-08-29	783	356	0.33	0.22	1.7	0.1	17.0	3.3
2004-09-04	6 128	1 428	0.29	0.23	0.8	0.1	17.0	3.4
2004-09-05	5 240	1 254	0.40	0.25	1.6	0.2	25.6	3.7
2004-09-07	2 437	452	0.38	0.21	8.3	0.1	27.0	1.7
2004-09-12	8 760	1 258	0.34	0.24	1.5	0.1	9.5	0.8
2004-09-14	10 630	1 224	1.26	0.25	298.0	3.4	31.0	6.0
2004-09-16	8 657	2 622	0.33	0.25	8.7	1.1	11.0	3.8

结果来看, 8 次飞行探测到的气溶胶浓度最大值的量级为 $10^2\sim10^4\text{ cm}^{-3}$ 。比较表 3 和表 4 可以看到, 气溶胶浓度的高低强烈依赖于天气状况, 特别是地面风速大小和逆温层情况, 其高浓度值发生在地面风速小或有逆温存在的状态下。地面风速一般在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。8 月 29 日晴空条件下, 近地面风速达到 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 气溶胶浓度最大值达到最小, 为 783 cm^{-3} 。尽管 9 月 7 日的地面风速也较大, 也都是晴天, 但是由于霾层的影响, 其垂直湍流扩散小于晴空状态, 气溶胶浓度与晴空的 8 月 29 日相比较较高, 但与其他比较仍然较小。

这 8 次探测到的气溶胶平均浓度值为 $10^2\sim10^3\text{ cm}^{-3}$, 与 20 世纪 80 年代末在北京地区观测的气溶胶粒子浓度最大值 70 cm^{-3} 相比大了 20~170 倍, 差了 1~3 个量级。造成气溶胶粒子浓度显著增加的原因是否是由城市人为气溶胶增加造成的

还需进一步研究。在 1982 年的西安^[9]、1996~1997 年的沈阳^[10]、1989 年的济南^[15]、1990 年的石家庄^[16,17]等城市周围地区以及 1995~1997 年的青海省农牧业区^[18], PMS 探测到的气溶胶浓度最大值分别为 38、5 086、 2.9×10^3 、 7.2×10^5 和 2 cm^{-3} , 其中石家庄地区的浓度平均值达到 $1.25\times10^4\sim3.52\times10^4\text{ cm}^{-3}$, 而北京地区的气溶胶浓度最大值是 $1.2\times10^4\text{ cm}^{-3}$ 。比较可知, 石家庄的气溶胶浓度最大, 空气污染较为严重。北京仅次于石家庄, 小一个量级。沈阳和济南地区的浓度量级都是 10^3 。80 年代初的西安气溶胶浓度较低, 与 80 年代末的北京在一个量级。青海农牧区的浓度最低, 可能是由于高原大气干净、污染少。

从气溶胶尺度看, 除了 9 月 14 日多云天气观测到的气溶胶粒子直径最大值达到 $1.26\text{ }\mu\text{m}$ 外, 其余 7 次观测得到的气溶胶直径主要集中在 0.29

~0.47 μm , 直径平均值集中在 0.21~0.31 μm 。

从 FSSP-100 云粒子探头的探测结果来看, 8 月 27 日和 9 月 14 日天空中有较深厚的云, 沙河机场气象台观测的云量分别达到 10 和 9, 因此 FSSP-100 能够观测到明显的云粒子浓度, 最大值分别达到 297.6 cm^{-3} 和 298.0 cm^{-3} , 平均值为 16.2 cm^{-3} 和 3.3 cm^{-3} 。其余几次都是在少云或晴天条件下探测的, 其浓度都很低, 最大量级只有 10^{-1} ~ 10^0 cm^{-3} , 平均值量级为 10^{-2} ~ 10^0 cm^{-3} , 主要集中在 0.1~0.2 cm^{-3} 的范围内。

3.2 垂直分布特征

图 1 给出了 8 次飞机上升观测中 PCASP 气溶胶探头得到的气溶胶粒子的浓度、直径的垂直分布; 为便于分析, 也给出了机载温度探头观测的大气环境温度廓线。在不同高度上出现的水平波动基本上是由水平飞行造成的。下面把探测资料按阴天和晴天两种情况进行分类分析。

阴天状况下 (图 1a、1g、1m 和 1o), 8 月 27 日 (图 1a) 的探测对象为 Sc 云, 但探测垂直范围基本在暖云区进行探测。在图 1a 中可以看到, 气溶胶浓度基本随高度递减。在 600 m 高度有高浓度值, 达到 8 000 cm^{-3} 以上, 根据观测记录, 主要是霾造成的。在 1 000 m 层左右的云中出現 0.45 μm 以上的气溶胶峰值直径。可见云区与非云区气溶胶的浓度和尺度是不一样的, 一般云区的气溶胶浓度高、尺度大。9 月 5 日 (图 1g) 飞行首先在沙河机场南侧盘旋飞行后, 向东南方向经过香河、大厂到达天津宝坻。垂直探测温度范围: 33.14 ~ -0.69 $^{\circ}\text{C}$ 。探测对象属于弱层状云降水天气。地面相对湿度达 76%。从图中看到, 近地面气溶胶浓度为 3 500 cm^{-3} 左右, 但水平分布不均匀。原因主要是飞机水平飞行过程中经过不同区域造成的, 接近城区的上空, 因污染原因, 气溶胶浓度一般较高。随后浓度随高度减小, 直到 1 500 m 进入层状云云底。St 云中的气溶胶浓度随高度略有增加, 量级由 10^1 增加到 10^2 cm^{-3} 。尺度随高度分布在 1 200 m 以下的大气边界层内, 基本为常数, 在 0.26 μm 左右。随后减小到 0.22 μm , 在层状云中又增加到 0.26 μm 左右。浓度和尺度在层状云中的水平变化相对云外较小。9 月 14 日 (图 1m) 是针对较深厚的层状云进行的飞行探测。垂直探测温度范围为 21.32 ~ -17.94 $^{\circ}\text{C}$,

是一次比较完整的层云探测过程。探测区域集中在北京西北的怀柔、张家口地区。因近地面风速小, 气溶胶浓度较高达到 6 000~8 000 cm^{-3} 以上。边界层内也具有明显的气溶胶高值霾层区。云可分为两层, 1 000~3 000 m 层为低云区, 3 000~3 800 m 之间有明显的干层。3 800 m 以上为高层状云区。低层云中的气溶胶浓度一般在 1 500 cm^{-3} 上下。干层中的气溶胶浓度一般在 150 cm^{-3} 上下。在高层层状云中可观测到最大 1 400 cm^{-3} 左右的气溶胶浓度。9 月 16 日 (图 1o) 的垂直探测温度范围 21.92~0.45 $^{\circ}\text{C}$, 是针对层积云暖区粒子分布特征的探测。近地层风速较低, 700 m 层以下垂直高度内, 气溶胶粒子浓度在 6 000 cm^{-3} 左右。700~1 000 m 层内存在一个强度是 1.60 $^{\circ}\text{C}$ (100 m) $^{-1}$ 的较强逆温层, 逆温层底 700 m 处有粒子浓度的极大值 8 600 cm^{-3} , 随高度增加, 逆温层内粒子浓度急剧减小到 2 000 cm^{-3} 。1 000 m 以上, 气溶胶浓度大体上逐渐减小, 几次平飞探测显示, 在层积云内粒子浓度的水平分布有起伏。1 500 m 以下, 气溶胶粒子的尺度基本上随着高度的升高而减小, 1 500 m 以上粒子直径在 0.16~0.28 μm 之间变化。从这天的探测结果可以看到, 逆温层的出现对气溶胶的垂直分布具有重要影响, 最大浓度值出现在逆温层底, 层积云内粒子水平分布不均匀。

晴天状况下 (图 1c、1e、1i 和 1k), 8 月 29 日 (图 1c) 的垂直探测温度范围为 28.52~6.22 $^{\circ}\text{C}$ 。近地层大气较干, 相对湿度为 33%。相比较而言, 气溶胶浓度较 8 月 27 日的云天情况下小的多。从地面到 250 m, 气溶胶浓度是减小的, 但在 250 m 层有一明显的峰值, 这可能是气溶胶浓度水平分布不均匀造成的。因为当天的逆温层并不明显, 只有轻雾。在不同高度的平飞中也出现明显的浓度水平变化。相对而言, 直径随高度变化很小, 基本在 0.22 μm 左右。9 月 4 日 (图 1e) 飞机从沙河机场起飞向北京东南方向飞行, 经香河到天津市以东上空进行的观测分布。垂直探测温度区间为 20.52~-3.75 $^{\circ}\text{C}$ 。近地层相对湿度达 67%。从图中看到, 浓度和直径的分布基本可以分为 2 层, 2 200 m 以下为霾层, 以上为 Ci 云层。从近地面到约 500 m, 气溶胶浓度是减小的, 但从 700 m 到 1 500 m 是增加的, 随后又减小。

大气低层 1 000~1 500 m 之间具有明显的逆温, 霾层气溶胶浓度在逆温层底较大, 气溶胶尺度在逆温层顶达到最大。进入卷云层后, 气溶胶浓度和尺度出现明显的随高度增加, 直到脱离云层。可见, 在较弱逆温和薄 Ci 云存在的情况下, 大气气溶胶的垂直分布特点是, 大约在 1 000~1 500 m 的大气边界层顶逆温区存在气溶胶的累积。薄的卷云区气溶胶浓度可达到 $2\,000\text{ cm}^{-3}$ 以上, 随高度有增加的趋势, 尺度基本在 $0.2\sim0.26\text{ }\mu\text{m}$ 范围。9 月 7 日 (图 1i) 飞机垂直探测温度范围为

$32.98\sim-1.73\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地面相对湿度为 31%, 并伴随有轻雾和霾。但地面风速较大, 达 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。垂直分布情况与 8 月 29 日的晴天状况基本相似, 近地层气溶胶浓度和尺度较大, 随着高度的增加逐渐减小。9 月 12 日 (图 1k) 的探测区域集中在北京西边的石景山、海淀及丰台地区。此次探测垂直温度范围为 $25.09\sim-22.19\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此对了解晴空大气高层背景气溶胶浓度和尺度分布很有意义。在 1 000 m 左右有一较强的逆温层。1 550 m 左右为大气边界层顶, 也是霾层顶, 大气

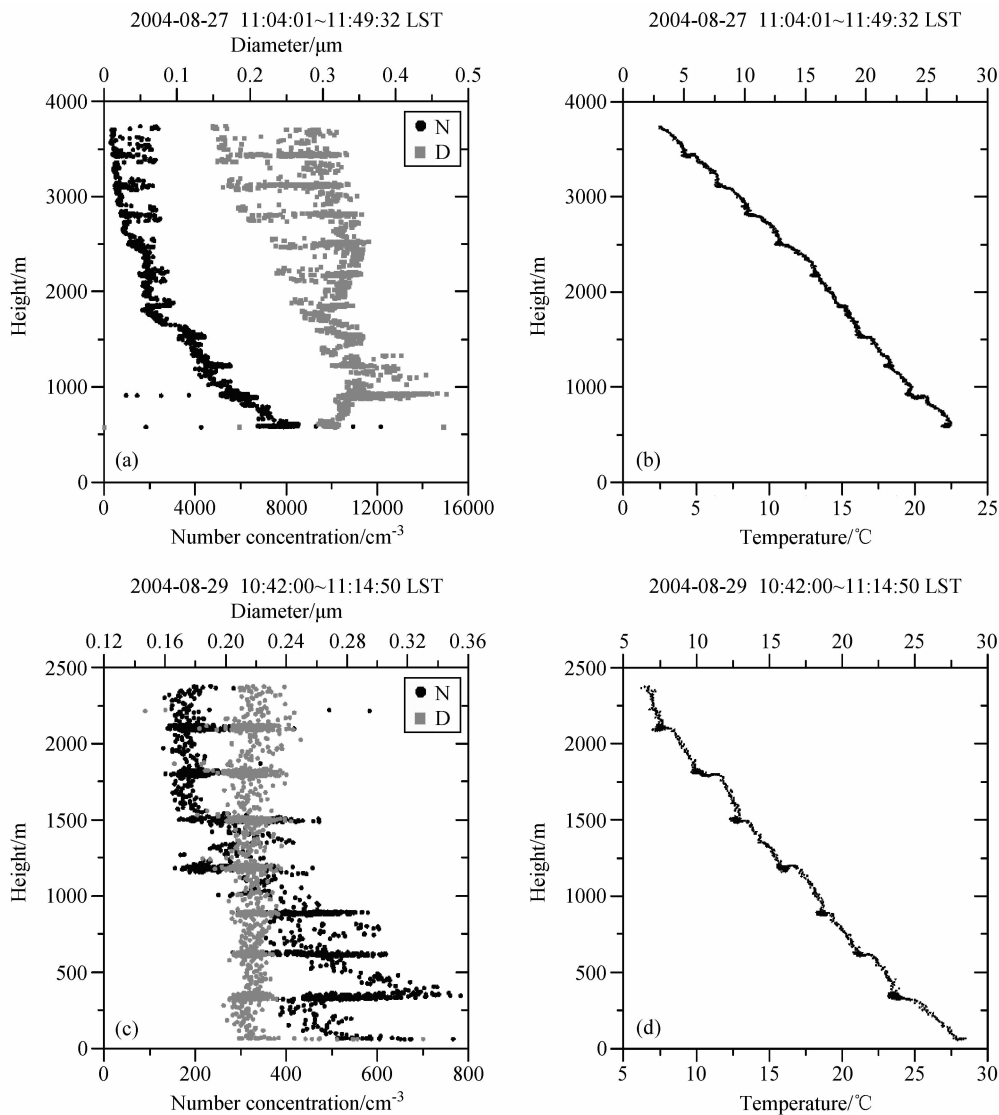


图 1 飞机上升阶段 PCASP 探头观测到气溶胶粒子的浓度、直径和环境温度的垂直分布 [左图表示浓度 (N, 深色)、直径 (D, 浅色) 随高度的分布, 右图表示同一天的大气环境温度廓线]

Fig. 1 Vertical distribution of aerosol number concentration, diameter and atmospheric temperature during ascending flights derived from PCASP [The left figures are number concentration (N, black dot) and diameter (D, gray rectangle). The right figures are corresponding vertical atmospheric temperature profile]

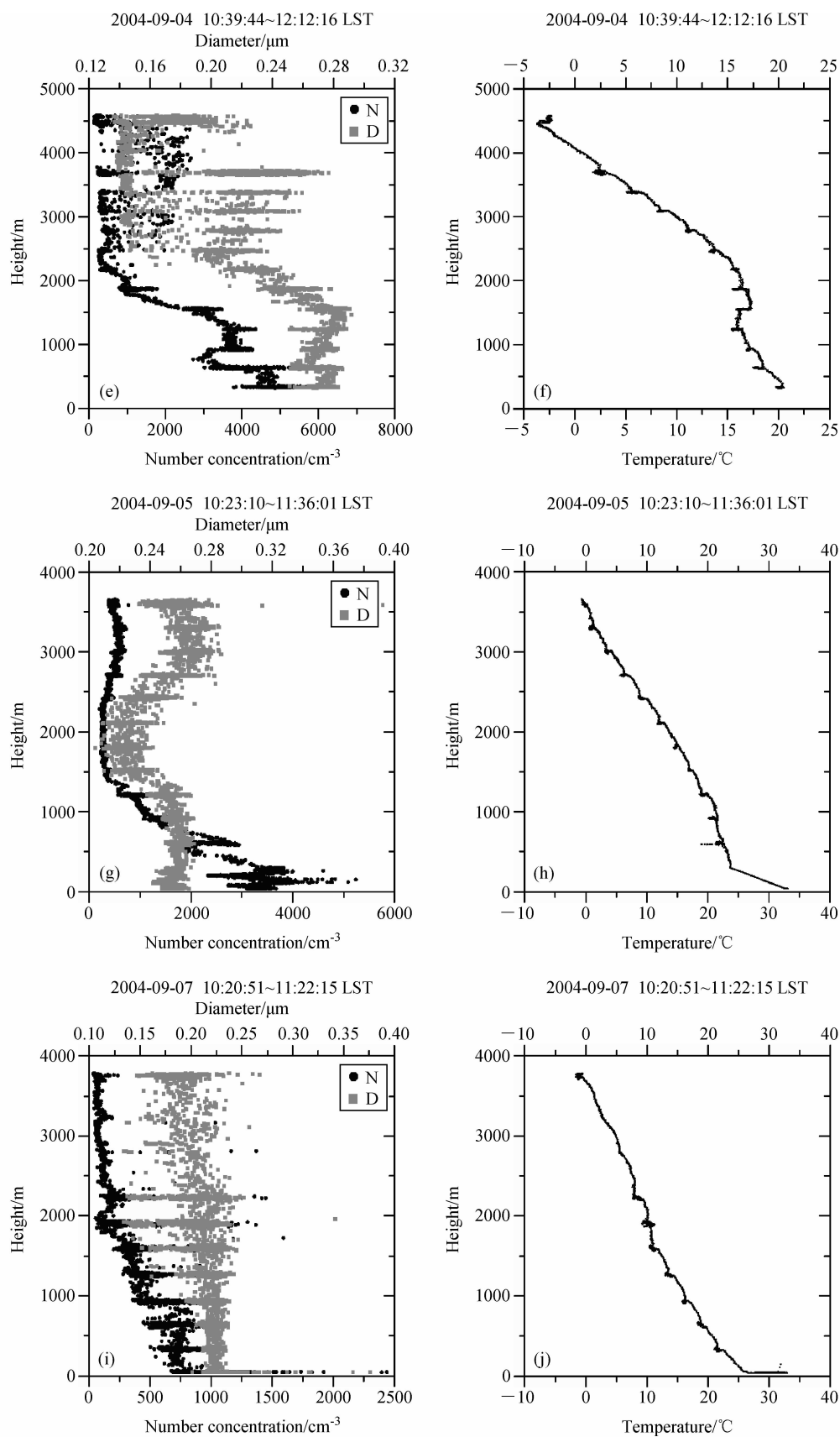


图 1 (续 1) Fig. 1 (Continued 1)

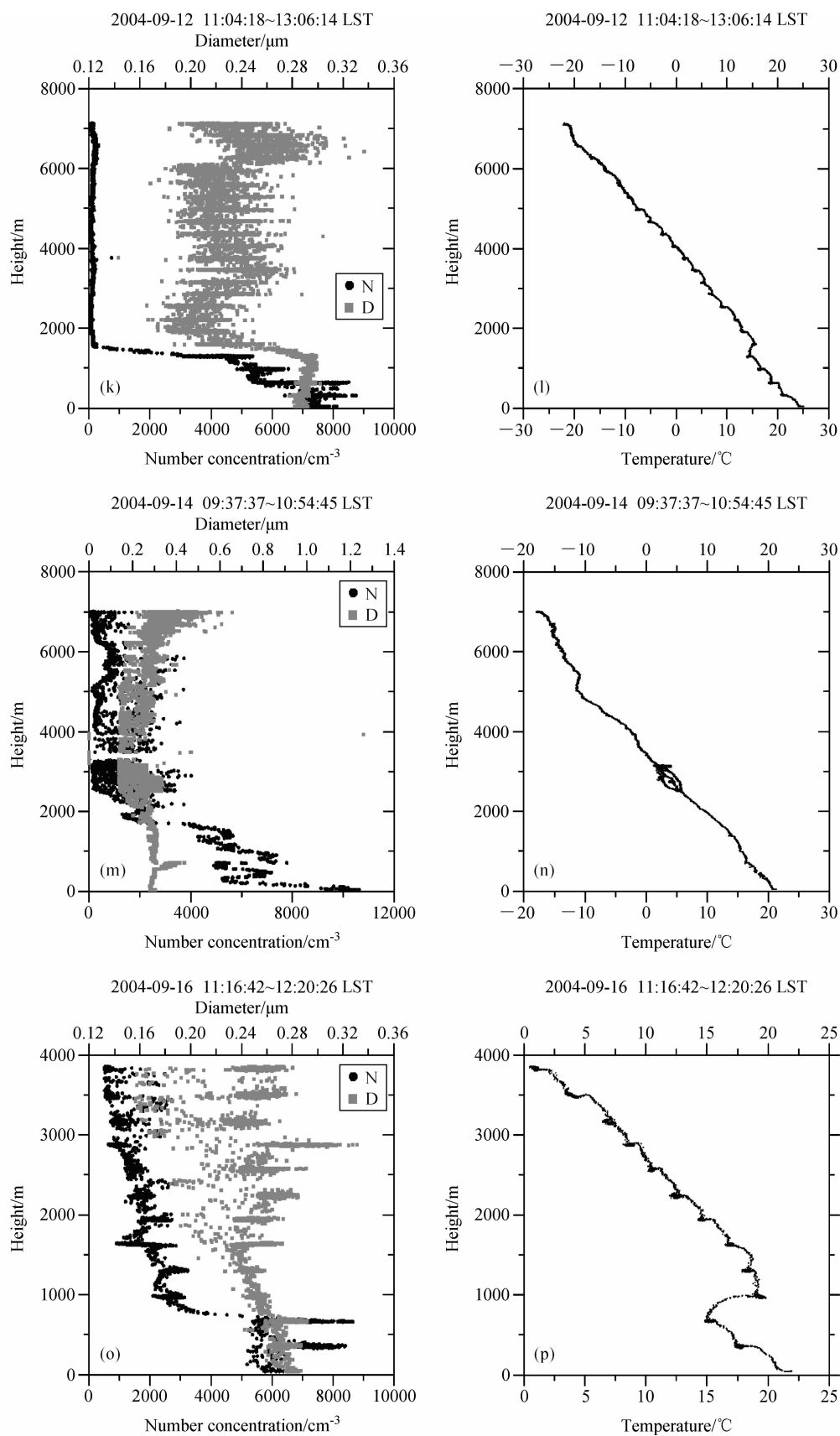


图 1 (续 2) Fig. 1 (Continued 2)

边界层内因逆温层的作用, 有较大的气溶胶浓度分布。在边界层以上, 气溶胶浓度急剧减小。可以看到, 在晴空状态下, 如果近地面向上输送的气溶胶受逆温层阻挡后, 边界层以上的晴空大气中气溶胶浓度是非常低的, 只有 $10^0 \sim 10^1 \text{ cm}^{-3}$ 的量级。在 6 000~6 500 m 出现的较高气溶胶浓度峰值, 尺度也较大, 这可能主要是来自西北高空的沙尘粒子。

从以上分析可以看出, 阴天和晴天的气溶胶垂直分布有很大的差异。除有云或大气低层有逆温状况外, 气溶胶浓度总体上都随着高度增加而减小。逆温层底是浓度的高值区, 此高度往上浓度值迅速减小 $3/4$, 9 月 12 日这天甚至减少了 1 个量级, 这就造成了粒子垂直分布的不连续。云区内的气溶胶浓度较云外高, 直径也比较大。混合层内, 气溶胶的水平分布不均匀。混合层外, 层积云或者卷云情况下有较大起伏, 无云或者层状云情况下气溶胶的水平变化相对较小。

3.3 水平分布特征

图 2~5 分别给出了在近地面 (600 m 左右) (图 2)、逆温层底 (图 3)、0 °C 层 (图 4)、7 000 m 高度 (图 5) 进行平飞或者平绕飞, 在 120 s 时间段内采样到的气溶胶 (PCASP) 水平分布特征。除了图 5 中 9 月 14 日飞机在河北张家口地区上空 7 000 m 处有水平飞行外, 其余各架次的水平飞行基本是在北京的昌平及其附近地区上空进行的。

从图 2 所显示的近地层气溶胶的水平分布可以看到, 由于飞行期间的天气、大气层结状况的显著差异, 气溶胶在近地层的水平分布也出现显著不同。相比而言, 在多云、逆温等天气状况下 (如 8 月 27 日、9 月 4 日和 9 月 12 日), 气溶胶的浓度显著偏高, 水平分布不均匀性大。特别在北京市区上空飞行时, 气溶胶浓度高出很多。同一架次中近地层的浓度最大相差近 $4\,000 \text{ cm}^{-3}$, 而直径基本集中在 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 之间。表 5 也显示出近地层气溶胶浓度和直径的起伏量比较小, 但极差较大, 说明水平分布的不均匀性程度。气溶胶在逆温层底的水平分布 (图 3), 随逆温层强度不同而变化, 逆温层强度越大, 气溶胶浓度越高, 但水平变化比较均匀 (见表 5)。逆温层底的浓度都在 10^3 量级, 粒子直径较图 2 近地层的更集中, 在 $0.25 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 之间变化。在 0 °C 层附近 (图

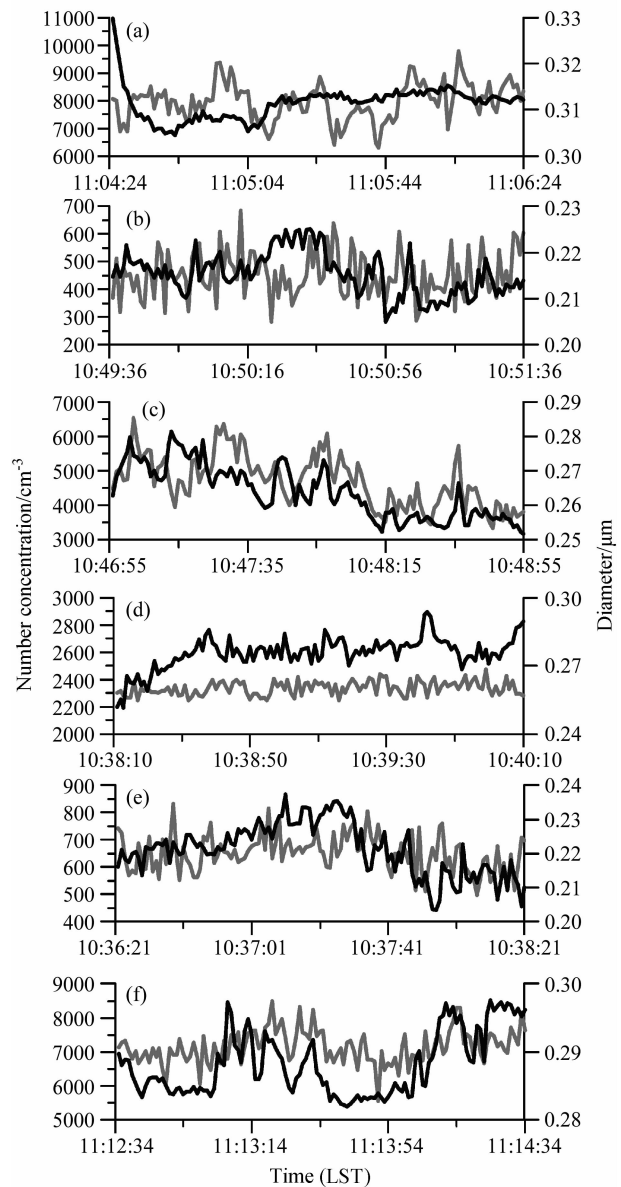


图 2 气溶胶粒子近地面的水平分布, 浓度 (黑实线); 直径 (灰实线): (a) 2004-08-27, 595 m, 22.18 °C; (b) 2004-08-29, 521 m, 21.15 °C; (c) 2004-09-04, 640 m, 17.79 °C; (d) 2004-09-05, 612 m, 21.60 °C; (e) 2004-09-07, 654 m, 18.54 °C; (f) 2004-09-12, 637 m, 18.83 °C

Fig. 2 Horizontal distributions of aerosol particles at the near ground surface, number concentration (black solid line); diameter (gray solid line): (a) 2004-08-27, 595 m, 22.18 °C; (b) 2004-08-29, 521 m, 21.15 °C; (c) 2004-09-04, 640 m, 17.79 °C; (d) 2004-09-05, 612 m, 21.60 °C; (e) 2004-09-07, 654 m, 18.54 °C; (f) 2004-09-12, 637 m, 18.83 °C

4), 气溶胶的分布随天气和大气层结状况不同而不同。在有逆温的状况下, 由于垂直输送显著减弱, 0 °C 层附近的气溶胶浓度较小。0 °C 层的浓度

表 5 气溶胶粒子浓度和直径水平分布统计量特征

Table 5 Characteristics of statistical variables of aerosol concentration and diameter

日期	起伏量				极值差			
	近地层	逆温层	0℃层	7 000 m	近地层	逆温层	0℃层	7 000 m
2004-08-27	0.075 (0.013)	—	—	—	0.534 (0.067)	—	—	—
2004-08-29	0.170 (0.023)	—	—	—	0.738 (0.112)	—	—	—
2004-09-04	0.177 (0.028)	0.046 (0.028)	—	—	0.711 (0.119)	0.192 (0.120)	—	—
2004-09-05	0.045 (0.012)	—	0.090 (0.065)	—	0.270 (0.053)	—	0.775 (0.612)	—
2004-09-07	0.145 (0.025)	—	—	—	0.640 (0.112)	—	—	—
2004-09-12	0.143 (0.009)	0.120 (0.013)	0.115 (0.051)	0.153 (0.078)	0.470 (0.050)	0.464 (0.062)	0.593 (0.244)	0.773 (0.343)
2004-09-14	—	—	—	1.138 (0.291)	—	—	—	7.062 (0.897)
2004-09-16	—	0.088 (0.019)	—	—	—	0.392 (0.100)	—	—

注：表中括号中的值为对应直径的统计量

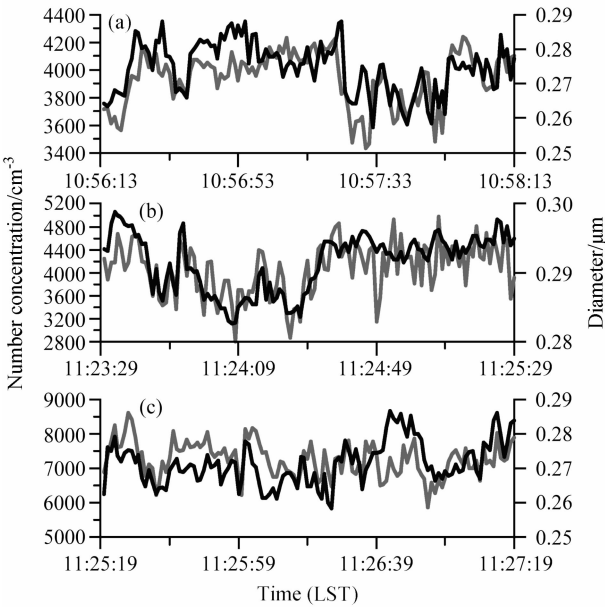


图 3 气溶胶粒子在逆温层底的水平分布，浓度（黑实线）；直径（灰实线）：（a）2004-09-04，1 230 m，15.72 °C；（b）2004-09-12，1 300 m，14.67 °C；（c）2004-09-16，700 m，15.32 °C

Fig. 3 Horizontal distributions of aerosol particles at the temperature inversion base, concentration (black solid line); diameter (gray solid line): (a) 2004-09-04, 1 230 m, 15.72 °C; (b) 2004-09-12, 1 300 m, 14.67 °C; (c) 2004-09-16, 700 m, 15.32 °C

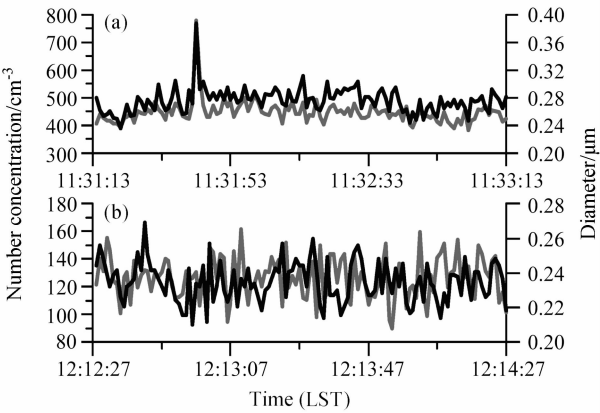


图 4 气溶胶粒子 0 °C 层的水平分布，浓度（黑实线）；直径（灰实线）：（a）2004-09-05，3 582 m；（b）2004-09-12，4 058 m

Fig. 4 Horizontal distribution of aerosol particles at 0 °C layer, number concentration (black solid line); diameter (gray solid line): (a) 2004-09-05, 3 582 m; (b) 2004-09-12, 4 058 m

在 10² 量级，而且 9 月 5 日的浓度是 9 月 12 日的 4 倍，粒子直径也较大，这可能是由于 9 月 5 日层状云的影响。表 5 所显示的气溶胶浓度和直径的极差在 0 °C 层的水平分布上也较大。高空（图 5）气溶胶分布差异也比较大，在弱不稳定的多云天气，高空气溶胶的浓度和尺度都较大，且水平分

布不均匀。9 月 12 日的粒子浓度在 120 cm^{-3} 左右变化, 尺度较小, 在 $0.19 \sim 0.26 \mu\text{m}$ 之间, 与图 4 中该天 0°C 层的水平变化相似。9 月 14 日的浓度和尺度变化较大, 粒子大小在 $0.3 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 范围内, 这也许与张家口地区的空气污染状况有关。气溶胶浓度和直径的极差也达到最大。浓度总体来说, 不论在近地层还是在高空, 气溶胶粒子浓

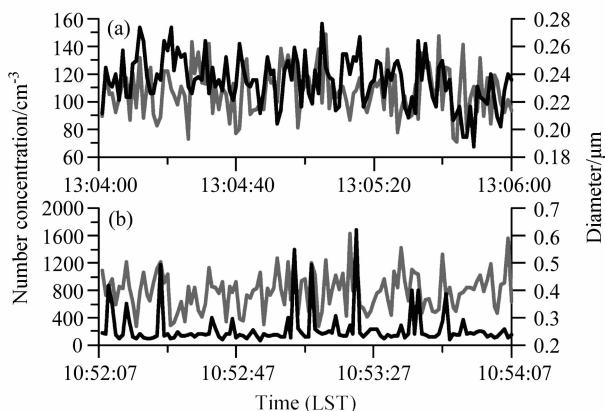


图5 气溶胶粒子 7 000 m 高度处的水平分布, 浓度 (黑实线); 直径 (灰实线): (a) 2004-09-12, 7 184 m, -21.61°C ; (b) 2004-09-14, 6 988 m, -17.57°C

Fig. 5 Horizontal distributions of aerosol particles at the 7 000 m height, number concentration (black solid line); diameter (gray solid line): (a) 2004-09-12, 7 184 m, -21.61°C ; (b) 2004-09-14, 6 988 m, -17.57°C

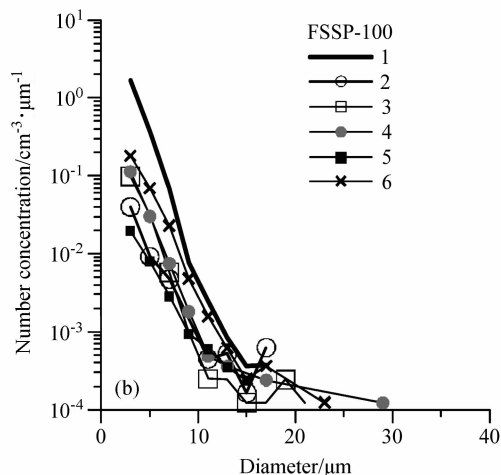
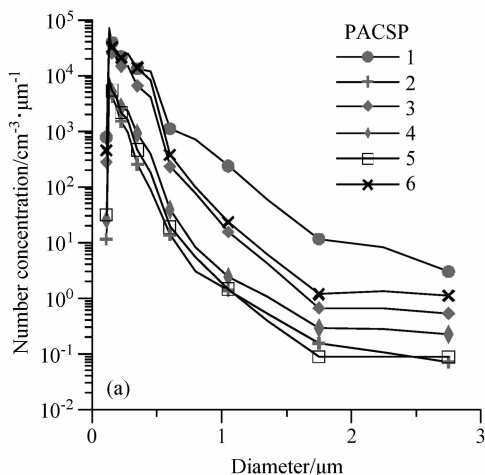


图6 近地面的平均谱: (a) PACSP; (b) FSSP-100. 1: 2004-08-27, 595 m, 22.18°C ; 2: 2004-08-29, 521 m, 21.15°C ; 3: 2004-09-04, 640 m, 17.79°C ; 4: 2004-09-05, 612 m, 21.60°C ; 5: 2004-09-07, 654 m, 18.54°C ; 6: 2004-09-12, 637 m, 18.83°C

Fig. 6 Mean size distributions of aerosol at the near surface: (a) PACSP; (b) FSSP-100. 1: 2004-08-27, 595 m, 22.18°C ; 2: 2004-08-29, 521 m, 21.15°C ; 3: 2004-09-04, 640 m, 17.79°C ; 4: 2004-09-05, 612 m, 21.60°C ; 5: 2004-09-07, 654 m, 18.54°C ; 6: 2004-09-12, 637 m, 18.83°C

度的水平起伏量在 $5\% \sim 18\%$, 这与北方的沈阳地区^[10]的水平分布相似, 呈不均匀分布。粒子直径虽然也有起伏, 但波动范围较小, 北京地区在 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 之间, 张家口地区最大为 $0.6 \mu\text{m}$ 。

3.4 平均谱分布特征

图 6~9 给出了分别与图 2~5 相对应的不同架次飞机平飞或者平绕飞观测时, 120 s 时间段内采样到的气溶胶 (PCASP) 和小云粒子 (FSSP-100) 平均谱。

由图 6a 可以看到, 近地面的气溶胶粒子谱型几乎一致, 基本为单峰分布。图中的一个明显特征是, 同尺度的粒子在不同大气状况下, 浓度含量不同, 主要受霾和逆温层状况影响较大。重霾天气下的气溶胶浓度一般要高出正常天气 1 个量级以上。图 6b 的云滴谱分布表明, 高气溶胶浓度也对应着高云滴浓度, 且谱型也基本是单峰分布。逆温层底具有接近甚至高于近地面的浓度含量 (图 7a), 如 9 月 4 日的情况。对应的小云滴谱型基本为单峰特征 (图 7b)。 0°C 层及其以上的气溶胶谱、小云粒子谱差别较大, 因天气状况不同而不同 (图 8, 9)。不同天气情况下气溶胶谱的宽度不同 (图 8a): 有云和降水天气下 (9 月 5 日) 的气溶胶谱较宽, 而晴天状况下 (9 月 12 日) 的谱较窄。在有云情况下对应的小云粒子谱有多峰特

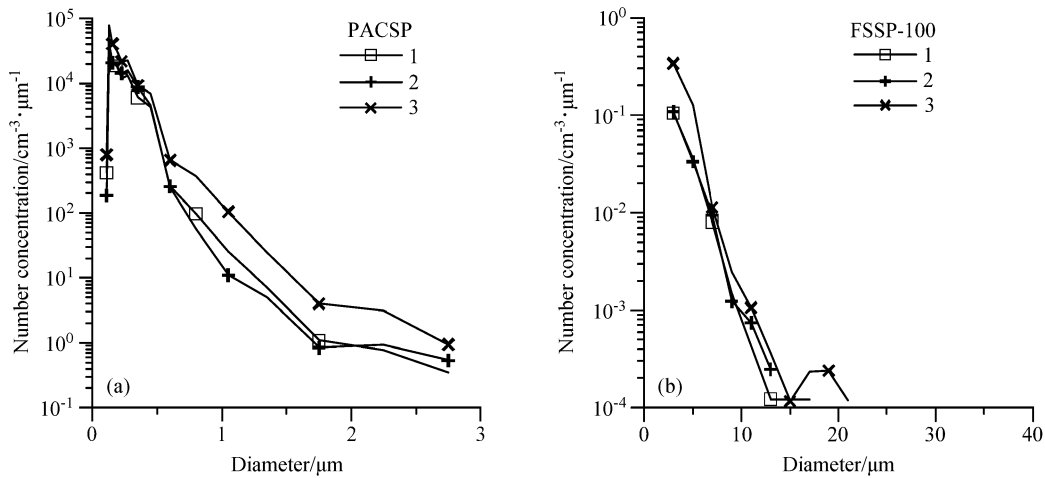


图7 逆温层底的平均谱: (a) PACSP; (b) FSSP-100。1: 2004-09-04, 1 230 m, 15.72 °C; 2: 2004-09-12, 1 300 m, 14.67 °C; 3: 2004-09-16, 700 m, 15.32 °C

Fig. 7 Mean size distributions of aerosol at the base of temperature inversion: (a) PACSP; (b) FSSP-100. 1: 2004-09-04, 1 230 m, 15.72 °C; 2: 2004-09-12, 1 300 m, 14.67 °C; 3: 2004-09-16, 700 m, 15.32 °C

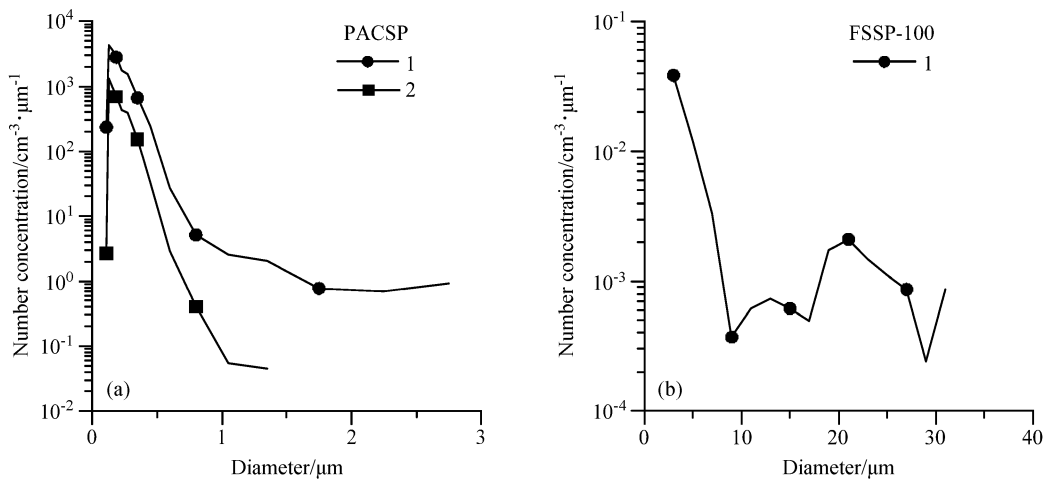


图8 0 °C层平均谱: (a) PACSP; (b) FSSP-100。1: 2004-09-05, 3 582 m; 2: 2004-09-12, 4 058 m

Fig. 8 Mean size distributions of aerosol at the layer of 0 °C: (a) PACSP; (b) FSSP-100. 1: 2004-09-05, 3 582 m; 2: 2004-09-12, 4 058 m

征 (图 8b)。对有高层探测的 9 月 14 日也具有同样的特征 (图 9)。

如果将整个上升阶段的探测结果做算术平均, 结果由图 10 给出。可以看到, 气溶胶谱分布均是单峰结构。峰值浓度最小的是 8 月 29 日 $4\,734\text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 属于晴天大风天气; 最大的是 9 月 16 日的 $72\,607\text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 属于强逆温的雾天天气。FSSP-100 谱分布都是随直径增加而减小。峰值浓度最小的是 9 月 7 日, 当天有轻雾和大风; 最大的是 8 月 27 日 $3.9\text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 是层状云天气, 而且云量大。整个平均的小云粒子谱分布

基本为单峰分布。

4 结论

本文对 2004 年 8、9 月期间在北京及其周边地区 8 次飞机气溶胶探测结果进行了初步分析, 有关结果总结如下:

(1) 北京及周边地区气溶胶的分布随天气状况不同具有较大的差异。特别是近地层逆温、风速、云状况对气溶胶的分布和谱分布影响很大。雾天和重霾状况下, 在地面风速较小的边界层内,

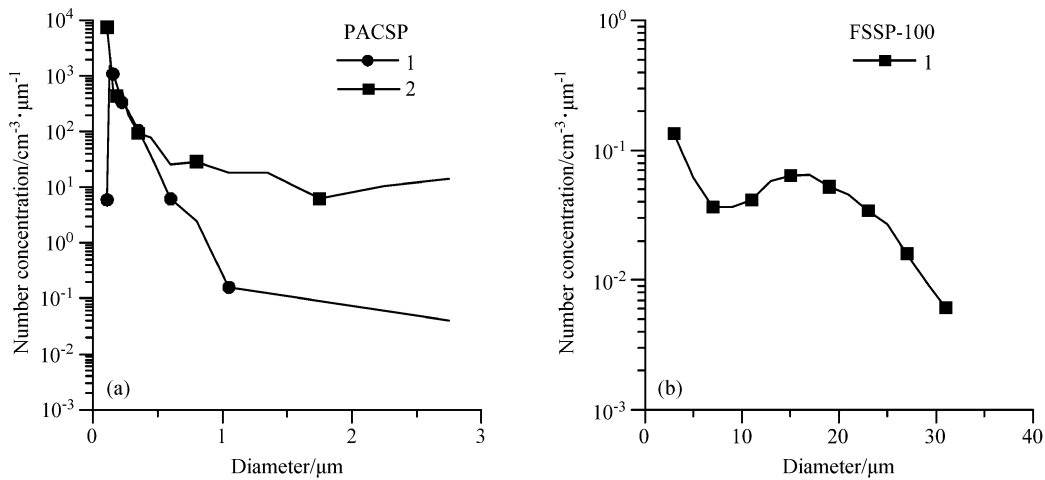


图9 7 000 m 高度处的平均谱: (a) PACSP; (b) FSSP-100。1: 2004-09-12, 7 184 m, -21.61°C ; 2: 2004-09-14, 6 988 m, -17.57°C

Fig. 9 Mean size distributions of aerosol at the 7 000 m height: (a) PACSP; (b) FSSP-100. 1: 2004-09-12, 7 184 m, -21.61°C ; 2: 2004-09-14, 6 988 m, -17.57°C

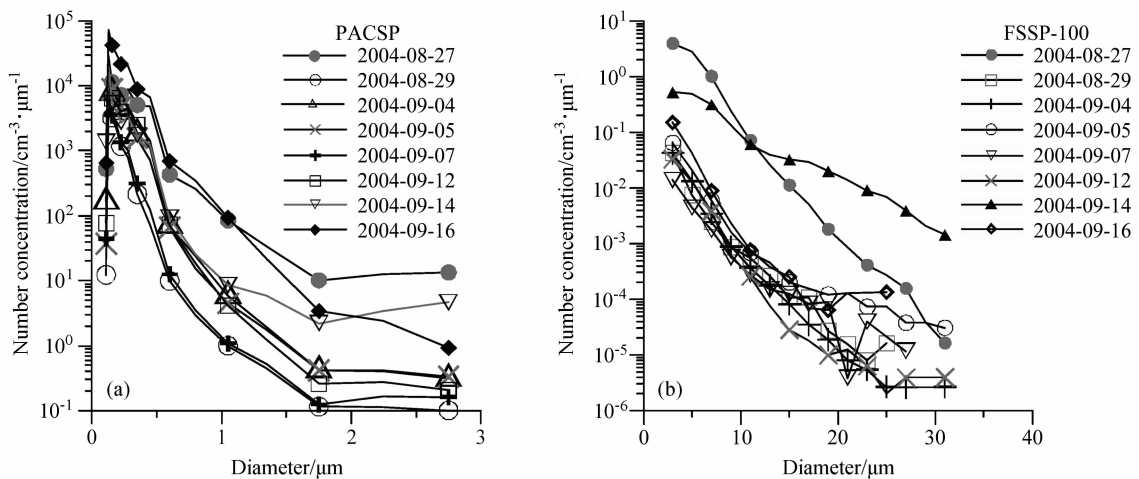


图10 各架次整个上升阶段气溶胶浓度的平均谱: (a) PACSP; (b) FSSP-100

Fig. 10 Mean size distributions of aerosol for each flight during ascending: (a) PACSP; (b) FSSP-100

浓度最大达到 $8\,000\text{ cm}^{-3}$ 以上, 逆温层底的霾粒子浓度较大, 霾粒的直径在 $0.24\sim0.40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。这 8 次飞行探测中, 气溶胶浓度最大值的量级在 $10^2\sim10^4\text{ cm}^{-3}$ 范围, 阴天时可达 $12\,169\text{ cm}^{-3}$, 风速较大的晴空最小, 只有 783 cm^{-3} ; 浓度均值 $10^2\sim10^3\text{ cm}^{-3}$; 气溶胶直径最大值主要集中在 $0.29\sim0.47\text{ }\mu\text{m}$, 平均值集中在 $0.21\sim0.31\text{ }\mu\text{m}$ 。

(2) 气溶胶浓度随高度的增加总的趋势是减小的, 但如果高空有卷云存在时, 有增加的现象。直径随高度的变化情况很复杂, 在晴天状况下, 一般气溶胶尺度随高度变化不大 (如 8 月 20 日、

9 月 7 日); 阴天情况下, 气溶胶尺度随高度在云层处有增加现象。逆温层底存在气溶胶和小云粒子的明显累积。

(3) 水平方向上, 气溶胶浓度的起伏量在 $5\%\sim18\%$ 之间。粒子直径虽然也有起伏, 但波动范围很小, 北京地区在 $0.2\sim0.4\text{ }\mu\text{m}$ 之间。

(4) 0°C 层以下的气溶胶和云滴谱呈单峰分布特点, 而 0°C 层以上, 气溶胶谱受云层影响较大, 谱宽出现明显差别, 对应的小云粒子谱出现多峰特征。但按整个上升阶段平均的气溶胶粒子谱均为单峰结构。

参考文献 (References)

- [1] 姚展予, 濮江平, 刘卫国, 等. 飞机探测云物理数据集的建立和应用. 应用气象学报, 2004, **15** (增刊): 68~74
Yao Zhanyu, Pu Jiangping, Liu Weiguo, et al. Foundation and application of cloud physics data set via aero-detection. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (Suppl.): 68~74
- [2] Kleinman L I, Daun P H. Vertical distribution of aerosol particles, water vapor, and insoluble trace gases in convectively mixed air. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96** (D1): 991~1005
- [3] Kim Y J, Sievering H, Boatman J F. Airborne measurement of atmospheric aerosol particles in the lower troposphere over the central United States. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93** (D10): 12631~12644
- [4] Fouquart Y, Bonnel B, Brogniez G, et al. Observations of Saharian aerosols: Results of ECLATS field experiment, Part II: Broad band radiative characteristics of the aerosols and vertical radiative flux divergence. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26** (1): 38~52
- [5] Alkezweeny A J. Field observations of in cloud nucleation and the modification of atmospheric aerosol size distributions after cloud evaporation. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 2649~2654
- [6] Twohy C H, Durkee A, Huebert B J, et al. Effect of aerosol particles on the microphysics of coastal stratiform cloud. *J. Climate*, 1995, **8**: 773~783
- [7] Gultepe I, Isaac G A, Leaitch W R, et al. Parameterizations of marine stratus microphysics based on in situ observations: Implication for GCMs. *J. Climate*, 1996, **9**: 345~357
- [8] 谷福印, 马培民, 游来光. 北京地区大气气溶胶的物理特性. 环境科学学报, 1989, **9** (3): 318~327
Gu Fuyin, Ma Peimin, You Laiguang. Physical characteristics of the atmospheric aerosols in Beijing area. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1989, **9** (3): 318~327
- [9] 何绍钦. 西安市一次晴空气溶胶粒子探测分析. 气象, 1987, **13** (5): 19~22
He Shaoqin. A case analysis of aerosol particles observation under fine weather over Xi'an. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1987, **13** (5): 19~22
- [10] 杨军, 周德平, 宫福久. 辽宁地区大气气溶胶粒子的垂直分布特征. 南京气象学院学报, 2000, **23** (2): 196~203
Yang Jun, Zhou Deping, Gong Fujiu. Vertical distribution of atmospheric particles over liaoning province, China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2000, **23** (2): 196~203
- [11] 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测, 大气科学, 2003, **27** (1): 1~7
Qiu Jinhuan, Zheng Siping, Huang Qirong, et al. Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 1~7
- [12] 许黎, 冈田菊夫, 张鹏, 等. 北京地区春末-秋初气溶胶理化特性的观测研究, 大气科学, 2002, **26** (3): 401~411
Xu Li, Okada Kikuo, Zhang Peng, et al. An observational study of physical and chemical characteristics of atmospheric aerosol particles from late spring to early autumn over the Beijing area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 401~411
- [13] 张仁健, 王明星, 戴淑玲, 等. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究, 气候与环境研究, 2000, **5** (1): 85~89
Zhang Renjian, Wang Mingxing, Dai Shuling, et al. Preliminary research on the size distribution of aerosols in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 85~89
- [14] 李照荣, 李荣庆, 李宝梓. 兰州地区秋季层状云垂直微物理结构特征分析. 高原气象, 2003, **22** (6): 583~589
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): 583~589
- [15] 王庆. 济南市一次晴空气溶胶粒子的特征分析. 山东气象, 1994, (4): 31~35
Wang Qing. Analysis on characteristics of aerosol particles in fine day over Jinan. *Shandong Meteorology* (in Chinese), 1994, (4): 31~35
- [16] 孙玉稳, 段英, 吴志会. 石家庄秋季大气气溶胶物理特性分析. 气象, 1996, **22** (2): 40~43
Sun Yuwen, Duan Ying, Wu Zhihui. The analysis of physical feature of aerosol particles in autumn over Shijiazhuang area. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1996, **22** (2): 40~43
- [17] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响. 南京气象学院学报, 2005, **28** (3): 360~368
Huang Mengyu, Zhao Chunsheng, Zhou Guangqiang, et al. Stratus cloud microphysical characters over north China region and the relationship between Aerosols and clouds. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (3): 360~368
- [18] 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 features for spring precipitation cloud layers in east of Qinghai. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20** (2): 191~196