

北京地区春季气溶胶分布特征的个例分析

黄海燕¹ 郑国光²

(1. 北京大学大气科学系, 100871; 2. 中国气象局)

提 要: 为探讨北京地区春季气溶胶分布特征, 利用机载 PMS 资料中的 Probe PCASP-100X 数据, 分析了 2005 年 4 月 2 日和 4 月 17 日北京地区的气溶胶垂直、水平分布的特征, 并初步讨论了气象因子和城市对气溶胶的影响。结果表明, 4 月 2 日的气溶胶平均浓度为 1422.7cm^{-3} , 4 月 17 日的平均浓度为 2142.1cm^{-3} , 平均直径分别为 $0.22\mu\text{m}$ 和 $0.25\mu\text{m}$ 。4 月 2 日和 4 月 17 日在北京沙河机场气溶胶数浓度垂直变化较大, 混合层顶上下具有不同的垂直分布特征, 温度层结对气溶胶浓度的分布有重要影响, 气溶胶水平分布不均匀, 北京市区的气溶胶浓度较大。

关键词: 气溶胶 PMS 分布特征

Distribution of Aerosol over Beijing: Case Study Based on Aircraft Measurement

Huang Haiyan¹ Zheng Guoguang²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. China Meteorological Administration)

Abstract: The two flights aerosol data sampled with Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe PCASP-100X probes of an airborne Particle Measurement System (PMS) in April 2 and April 17, 2005 over Beijing were analyzed. The result shows that the maximum of number concentrations of aerosol in those two days were 1422.7cm^{-3} and 2142.1cm^{-3} . The mean diameters were $0.22\mu\text{m}$ and $0.25\mu\text{m}$, respectively. There were a strong gradient of number concentration of aerosol over Shahe Airport. Temperature inversion and other meteorological factors, such as the planet boundary layer, had important influence on the number concentration of aerosol and mean diameter. Location also has an important impact on aerosol.

Key Words: aerosol particle measurement system (PMS) distributive character

引 言

气溶胶对辐射、云、降水以及气候环境有重要影响。气溶胶影响地气辐射系统,改变大气的能量收支;气溶胶在大气中可以成为云凝结核(CCN)或者冰核(IN),影响云和降水的形成。而人类排放大量的气溶胶,使云滴数密度增加,云滴平均半径减小,改变云的辐射特性,使云的生命期延长,减少降水^[1]。以上效应会影响地气系统的能量收支,从而对气候产生影响^[2]。气溶胶粒子是主要污染物之一,影响空气质量和能见度以及人类健康^[3]。

气溶胶的基本特征的研究一直是大气物理重点领域,对气溶胶特性的研究是确定其气候效应的基础。对大气气溶胶的直接观测是一种广泛使用的研究手段。机载粒子探测系统 PMS(Particle Measurement System)是研究云微物理特征和大气气溶胶与云相互作用的重要工具。其中的 PSSCP 为气溶胶探头,可以直接连续观测气溶胶直径和浓度的资料。20 世纪 60 年代以来,国外进行了大量的 PMS 飞机探测^[4-7]。从 20 世纪 80 年代开始,我国科研人员利用 PMS 的气溶胶探头在一些地区进行飞机探测试验。何绍钦^[8]分析了 1982 年夏天在西安的一次晴空探测,发现西安晴空气溶胶粒子浓度最大值 38cm^{-3} ,最小值为 4cm^{-3} ,浓度最大值出现在 700~1000m 高度处,在近地层谱分布满足荣格分布。孙玉稳等^[9]分析了 1990 年秋河北人工影响天气办公室利用 PMS 对河北南部地区的飞机观测资料,结果表明,石家庄地区的气溶胶源于本地。逆温层影响气溶胶的垂直分布。杨军等^[10]对辽宁 1996—1997 年春夏气溶胶观测表明,在混合层以下的气溶胶数密度不严格满足幂指数分布。黄梦宇等^[11]在对 1990—1991 年河北 PMS 观测资料分析时发现,层状云云滴浓度与云下气溶胶浓度存在正相关关系。成天涛等^[12]分析了 2005

年 4—5 月份内蒙古浑善达克地区沙尘气溶胶的浓度和谱分布,结果表明沙尘气溶胶的浓度主要与风速、天气现象等因素有关。

北京地区近年来城市发展迅速,气溶胶的分布是研究北京地区的云、降水、环境和气候变化的重要问题。

利用 PMS 中的 PSSCP-100X 探头观测到数据以及机载 GPS 系统所得的温湿资料分析了 2005 年 4 月 2 日和 4 月 17 日两个架次 PCASP-100X 的气溶胶粒子分布航测资料。选取这两天是因为其处于同一季节的不同气象条件:晴和霾,飞行航线中有重合。分析了两架次中气溶胶粒子垂直和水平的分布特征、气象条件以及地区的关系。

1 仪器和方法

1.1 探测仪器

探测飞机上装载的探测仪器有 GPS 全球定位系统、温湿度探头、机载微波辐射计、热线含水量仪、PMS 粒子测量系统等。PMS 系统主要包括气溶胶粒子探头 PCASP-100X、一维云粒子探头 FSSP-100-ER、二维灰度云粒子探头 OAP DGA-2 和 OAP DGB-2 等。这些探头均是根据米散射理论,依散射光强的大小,推算粒子的尺度。其中 PCASP-100X 可汇集所有方向散射光来测量粒子,分 15 个通道,分辨率由 $0.02\mu\text{m}$ 逐渐增加到 $0.5\mu\text{m}$,探测范围为 $0.11\sim 2.75\mu\text{m}$ 。各探测仪器每秒采样一次。

1.2 飞机探测概况

4 月 2 日和 4 月 17 日探测都历时 3 小时左右,高度均在 4000m 以下。4 月 2 日航线为沙河—昌平—易县—北京—沙河北部,飞行的纬度区间为 $38.20^{\circ}\sim 42.38^{\circ}\text{N}$ 。4 月 17 日航线为沙河—廊坊—渤海湾—天津—北京—沙河,飞行的纬度区间为 $38.90^{\circ}\sim 40.10^{\circ}\text{N}$ 。表 1 给出两次飞行概况。

表 1 2005 年航测概况

日期/月—日	飞行区域	高度/m	地面天气类型	云状	地面风向	地面风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
04—02	沙河—保定—北京	3632	晴	无	西南	1
04—17	沙河—渤海—北京	3764	霾	Ac/Sc		0

1.3 计算公式

浓度: $N_a = \sum_{i=1}^{nbin} n_i \Delta d_i$

平均直径: $M_d = \frac{\sum_{i=1}^{nbin} n_i \Delta d_i d_i}{\sum_{i=1}^{nbin} n_i \Delta d_i}$

式中, N_a :气溶胶浓度,单位为 cm^{-3} ;

d_i :第 i 通道粒子的中值直径,单位为 μm ;

Δd_i :第 i 通道直径间隔;

n_i :第 i 通道的粒子数密度,单位为 $\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$;

M_d :平均直径,单位为 μm 。

2 结果分析

4 月 2 日气溶胶数平均浓度和最大浓度均小于 4 月 17 日相应的值(表 2)。气溶胶浓度总体飞行过程中最大值都分别为 5927.9 cm^{-3} 和 8931.9 cm^{-3} 。而以前试验在北京地区探测到的春季最大气溶胶浓度为 12000 cm^{-3} ^[11], 这两天的气溶胶最大浓度均小于此值。平均直径 M_d 分别为 $0.22 \mu\text{m}$ 和 $0.25 \mu\text{m}$, 与 2004 年秋季探测的结果基本一致^[13]。最大直径为 $0.69 \mu\text{m}$ 和 $0.52 \mu\text{m}$, 略大于 2004 年秋季的探测结果。

表 2 气溶胶特性统计表

日期 (月—日)	浓度/ cm^{-3}		平均直径/ μm	
	最大值	平均值	最大值	平均值
04—02	5927.9	1422.7	0.69	0.22
04—17	8931.9	2142.1	0.52	0.25

2.1 垂直分布特征

图 1 和图 2 分别给出了在 4 月 2 日和 4

月 17 日飞机起飞上升过程中沙河机场上空的气溶胶特性的分布。

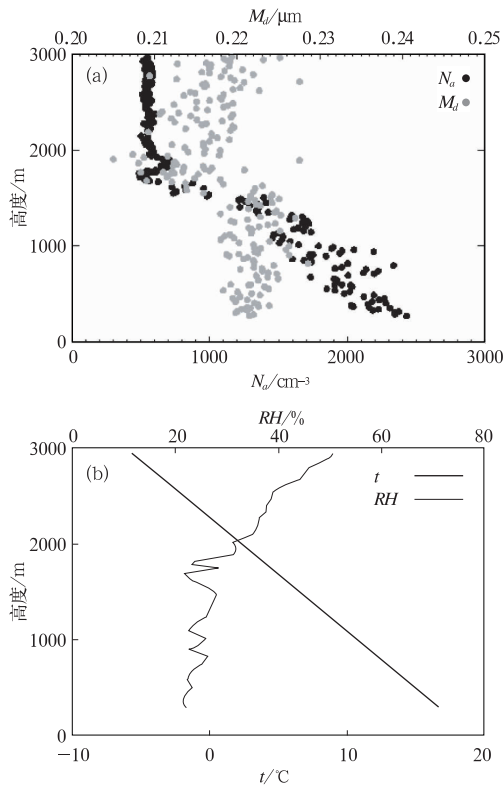


图 1 2005 年 4 月 2 日起飞上升过程

4 月 2 日起飞上升阶段,沙河为晴天弱风天气。垂直探温范围在 $-3 \sim 18^\circ\text{C}$ 之间,近地面相对湿度为 25%,不存在逆温。气溶胶浓度极大值出现在近地面,水平方向上有小波动,主要是由飞机水平飞行过程中经过不同区域造成的。混合层在 1200m 左右。在混合层内,相对湿度较小,气溶胶浓度随高度变化很小,在 2000 cm^{-3} 左右。平均直径 M_d 维持在 $0.22 \mu\text{m}$ 左右。在混合层以上,气溶胶浓度 N_a 急剧减小,到 1800m 附近只有 500 cm^{-3} 左右。

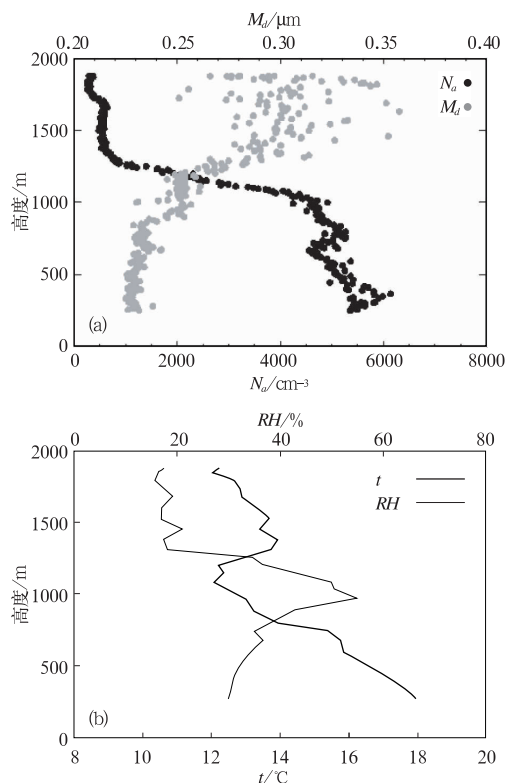


图2 2005年4月17日起飞上升过程

根据飞行记录,4月17日起飞时在3000m以上有高积云(Ac)存在。近地面有弱霾,无风,相对湿度为30%。垂直探测区间的温度为8~18 $^{\circ}\text{C}$ 。气溶胶浓度比4月2日起飞过程大得多。气溶胶浓度和尺度分布基本上可以分为2层。在1000m以上有逆温层存在,1000m以内为霾层,近地面浓度大于6000 cm^{-3} ,由于湍流混合作用,气溶胶随高度减小缓慢,各种特性随高度变化很小。在此高度以上的大气中,浓度随高度迅速减小。

4月2日降落过程(图3),垂直探温范围为一11~20 $^{\circ}\text{C}$,0 $^{\circ}\text{C}$ 线在2500m附近。逆温层位于500~700m之间。在逆温层下,气溶胶浓度达到最大,尺度变化不大。逆温层以上,浓度随高度减小。在2300m处有弱云区出现,在云内外粒子浓度和尺度分布不均

匀。云区内数据的浓度和尺度偏大,这可能是由于在云区内部,相对湿度较大,可作为CCN的气溶胶吸湿增长,使粒子谱加宽。但在云区内测得的气溶胶数据有可能混有小云滴。

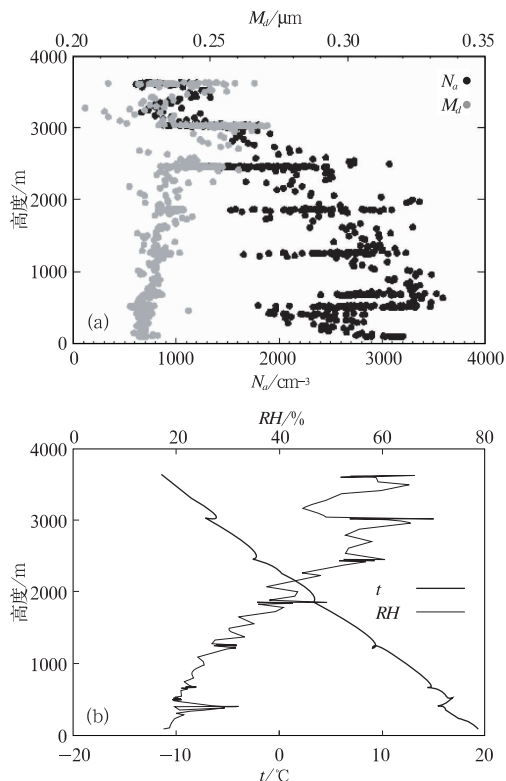


图3 2005年4月2日降落过程

4月17日降落过程(图4),垂直探温范围在一3.5~20 $^{\circ}\text{C}$,逆温层在1000~1200m,边界层顶在1200m左右。近地面大气相对湿度为35%。气溶胶浓度和尺度均大于4月2日的降落过程。在近地面,浓度大于8000 cm^{-3} 。在1000m达到最大值。这是由于逆温层对湍流发展有抑制,气溶胶易于积聚。在逆温层上,气溶胶浓度随高度迅速减小,尺度范围开始增大。

由以上分析可知,这两天气溶胶的垂直分布有很大差异。但总体来说,低层气溶胶

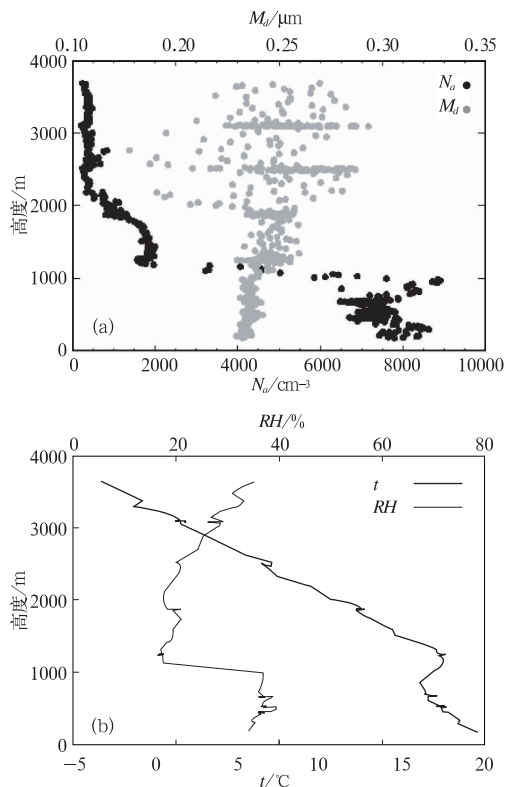


图 4 2005 年 4 月 17 日降落过程

浓度大,这是因为低层气溶胶粒子主要来源是地面。除逆温层外,气溶胶浓度总体上都随高度增加而减小,边界层内气溶胶浓度大于自由大气,浓度的最大值出现在逆温层底部。有霾且风速较小时,气溶胶浓度数大于晴天条件。在边界层内,由于湍流混合作用,不同高度气溶胶尺度相近,大部分在 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 之间。边界层以上,粒子尺度变化比较复杂,当有弱云区出现时,粒子尺度范围增大,原因应该是在云区内部,相对湿度比较大,一部分吸湿性气溶胶粒子会增长。

2.2 水平分布特征

图 5(见彩页)和图 6(见彩页)分别表示在平飞或绕飞路线上的气溶胶特性的水平分布。黑色实线代表飞机主要的水平飞行的高度随时间的变化(左纵坐标和上横坐标)。其

中 I、II、III 分别代表三个主要水平飞行过程,蓝色、红色和绿色实线分别对应 I、II 和 III 三个高度上的浓度和平均直径随纬度的变化(右纵坐标和下横坐标)。第 I 阶段(蓝线)飞行高度为 3100m,方向为由北向南,经过北京西南,大兴和河北安平等地。可见在这个高度上,北京市区($39.3^{\circ} \sim 39.5^{\circ}\text{N}$)的浓度略大于其他地区上空,但整个过程浓度均小于 1000cm^{-3} 。第 II 阶段(红线)高度为 1600m,方向由南向北飞过河北安平,大兴和北京西南上空。总体来说,这个高度上气溶胶浓度大于 3100m 上的浓度。在同高度上,北京市区内的气溶胶浓度显著大于其他地区。第 III 阶段(绿线),高度为 1000m,方向为从北京北三环由南向北到沙河南部。气溶胶浓度波动比较大,但是趋势由南向北逐渐减小。

由图 6(见彩页)可知,在三个阶段上气溶胶平均直径集中在 $0.22 \sim 0.24 \mu\text{m}$ 之间,第 I、II 阶段由南向北逐渐增大,北京市区内气溶胶平均直径大于其他地区。

图 7(见彩页)和图 8(见彩页)中,黑色实线代表飞机主要的水平飞行的高度随时间的变化(左纵坐标和上横坐标)。其中 I、II、III 分别代表 4 月 17 日三个主要水平飞行过程,蓝色、红色、绿色实线分别对应 I、II、III 三个高度上的浓度和平均直径随纬度的变化(右纵坐标和下横坐标)。图 7 中,第 I 阶段(蓝线)对应高度为 1610m,飞行方向由北京东部东南方向,经河北到达渤海湾附近。在此阶段,气溶胶浓度分布曲线出现两个比较明显的大值区,根据 GPS 资料,这两个大值区分别位于北京市区和河北唐山附近,可见当时唐山上空的气溶胶浓度也比较大。第 II 阶段(红线),飞行高度为 1580m,方向由东南向西北,经保定北部—大兴—北京北三环附近。此阶段上气溶胶浓度随纬度变化很小,浓度维持在小于 1500cm^{-3} ,是由于当天北京市区

的逆温层抑制了底层气溶胶向上输送。第 III 阶段(绿线),飞机由南向北自北三环附近至沙河机场上空,飞行高度在 980m 左右。当天的逆温层位于 1000m 到 1200m,此阶段位于逆温层下,气溶胶浓度波动很大,平均浓度为 4500cm^{-3} 。

由图 8(见彩页)可知,当天第 I 阶段的气溶胶平均直径变化较大,在 $0.25\sim 0.35\mu\text{m}$ 之间,这应该是由于此阶段飞行路径经过的不同区域有关。第 II 和第 III 阶段气溶胶平均直径变化较小。

图 9 给出了 4 月 2 日在不同地点不同高度进行平飞 120s 时间段内采样的气溶胶水平分布特征。其中,urban 代表在北京市区内取样,rural 为在大兴以及附近地区。根据 GPS 资料,在 3100m 和 1600m 分别取市区内和郊区两个地点,1000m 取北京市区内。从图 9 显示的气溶胶水平分布可以看到,总体来说,在同一地点,气溶胶浓度随高度增加而减小。在同一高度处,市区内气溶胶浓度大于郊区。但是随高度的增加,市区内外气溶胶浓度的差值在减小,在 1600m 上,市区内气溶胶浓度大多大于 2000cm^{-3} ,而在郊区仅为 1000cm^{-3} 左右。而在 3100m 上,市内仍大于郊区,但是相差不大。

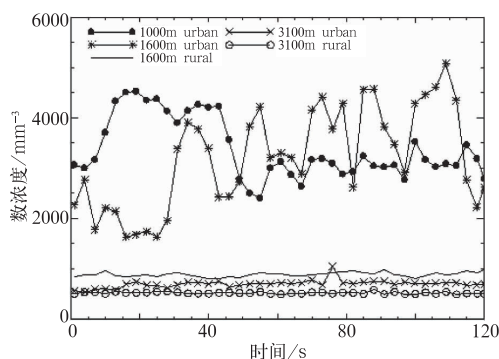


图 9 2005 年 4 月 2 日不同高度、地点气溶胶浓度水平分布

图 10 给出了与图 9 相对应的平均谱分布。在 4 月 2 日气溶胶粒子谱型基本一致,为

单峰分布,主要集中在小粒子端。在 3100m 和 1600m 高度处,在整个尺度范围内,北京市区气溶胶浓度均大于其他地区。

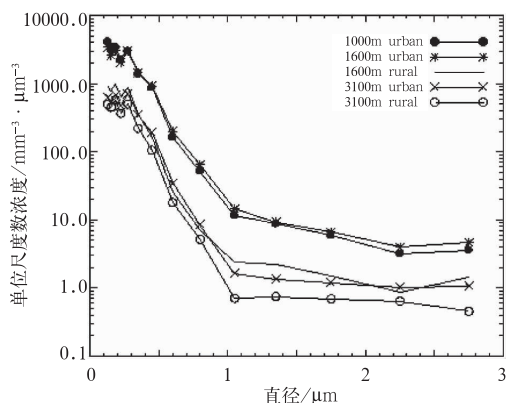


图 10 2005 年 4 月 2 日气溶胶平均谱分布

图 11 给出了 4 月 17 日气溶胶浓度在不同地点和不同高度处 120s 水平平均。在 1610m 上和 1580m 上各取两个地点的值,分别为北京上空、北京郊区,在 980m 上取北京市区。总体的分布仍为同地点处高层小于低层,同高度处郊区小于市区。除 980m 北京上空的分布外,其他的几段的分布很类似,北京市区内的 980m 上的浓度明显大于其他段的值,而在 1600m 左右的浓度基本上小于 2000cm^{-3} ,原因是底层气溶胶的向上输送受到逆温层的抑制。由图 12 可知,气溶胶粒子谱型相似,都为单峰型分布,小粒子浓度远大于大粒子浓度,粒子主要集中在直径小于 $1.25\mu\text{m}$ 的范围内。

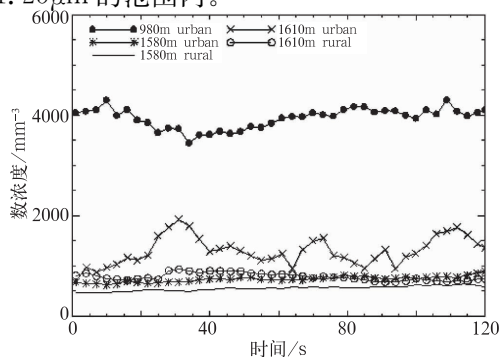


图 11 2005 年 4 月 17 日不同高度、地点气溶胶浓度分布

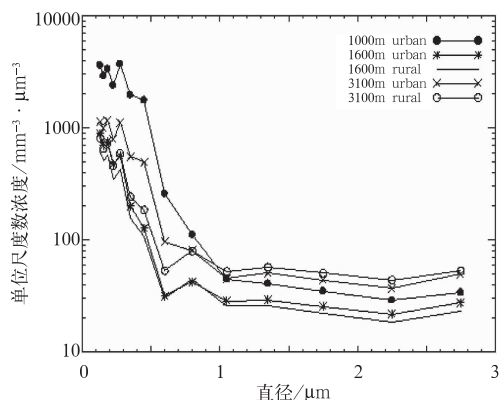


图12 2005年4月17日气溶胶平均谱

3 结论

本文对2005年4月2日和4月17日在北京以及周边地区进行的2次飞机气溶胶探测结果进行了初步分析。结论如下:

(1) 2005年4月2日和4月17日气溶胶浓度和尺度都小于以往的阴天或多云状态下的观测结果。气溶胶高浓度主要分布在2000m以下。气溶胶分布规律与当时的气象条件有直接关系。温度廓线和混合层顶高度都对气溶胶分布有重要影响。

(2) 除逆温层外,气溶胶浓度随高度的增加总的趋势是减小的。4月2日无逆温,气溶胶浓度最大值出现在近地面。4月17日有逆温层,气溶胶垂直分布的最大浓度出现在逆温层底部。气溶胶浓度在混合层以下浓度、平均直径不随高度变化或变化很小。在混合层以上,浓度随高度迅速减小,平均直径随高度变化比较复杂,特别是当有弱云区出现时,尺度范围增大,应该是由云内相对湿度较大,气溶胶中的吸湿性粒子开始增长。

(3) 大气中的气溶胶分布规律,除了与大气层结状态有关外,还与气溶胶的排放源有直接关系。北京市内的气溶胶浓度比同高度的市郊大。

(4) 4月2日和4月17日这两天气溶胶

粒子谱型基本上为单峰分布,粒子主要集中在小粒子端。

参考文献

- [1] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. Science, 1992, 255(5043): 423-430.
- [2] 毛节泰,张军华,王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- [3] Zhang Qiang, Zhao Chunsheng. Characterizations of aerosols over the Beijing Region: A case study of aircraft measurements [J]. Atmospheric Environment, 2006; 45: 13-45.
- [4] Kleinman L I, Daun P H. Vertical distribution of aerosol particles, water vapor, and insoluble trace gases in convectively mixed air[J]. J Geophys Res, 1991, 96 (D1): 991-1005.
- [5] Kim Y J, Sievering H, Boatman J F. Airborne measurement of atmospheric aerosol particles in the lower troposphere over the central United States [J]. J Geophysics Res, 1988, 93 (D10): 12631-12644.
- [6] Fouquart Y, Bonnel B, Brogniez G, et al. Observations of Saharan aerosols: Results of ECLA TS field experiment, Part E: Broadband radiative characteristics of the aerosols and vertical radiative flux divergence [J]. J Climate Appl Meteor, 1987, 26 (1): 38-52.
- [7] Isaac G A, Leaitch W R, Strapp J W, et al. Summer aerosol profiles over Algonquin Park, Canada [J]. Atmos Environ, 1986, 20(1): 157-172.
- [8] 何绍钦. 西安市一次晴空气溶胶粒子探测分析[J]. 气象, 1987, 13(5): 19-22.
- [9] 孙玉稳,段英,吴志会. 石家庄秋季大气气溶胶物理特征分析[J]. 气象, 1996, 22(2): 41-44.
- [10] 杨军,周德平,宫永福. 辽宁地区大气气溶胶粒子的垂直分布特征[J]. 南京气象学院报, 2000, 23(2): 197-203.
- [11] 黄梦宇,赵春生. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响[J]. 南京气象学院报, 2005, 18(3): 360-367.
- [12] 成天涛,吕达仁,陈洪斌,等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶物理的粒谱特性[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 48-153.
- [13] 范烨,郭学良,付丹红. 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, 2007, 12(1): 49-62.

黄海燕等：北京地区春季气溶胶分布特征的个例分析

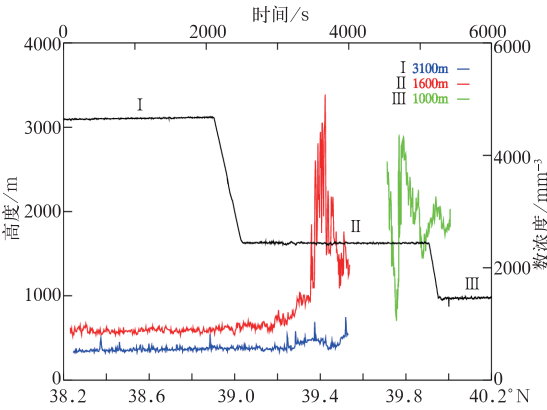


图 5 2005年4月2日气溶胶浓度水平分布

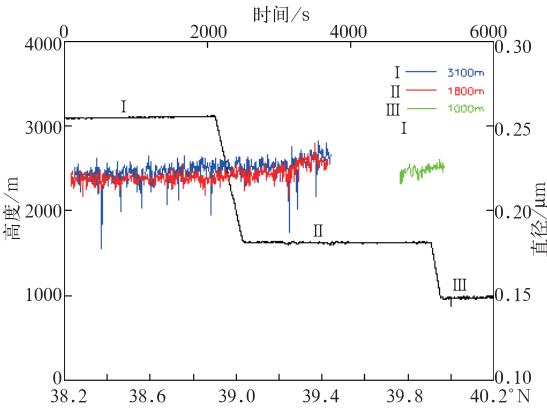


图 6 2005年4月2日气溶胶平均直径水平分布

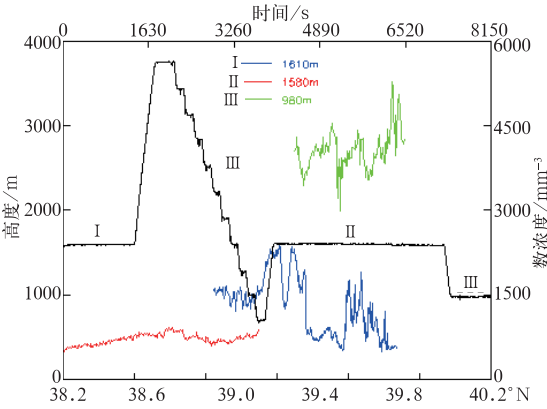


图 7 2005年4月17日气溶胶浓度水平分布

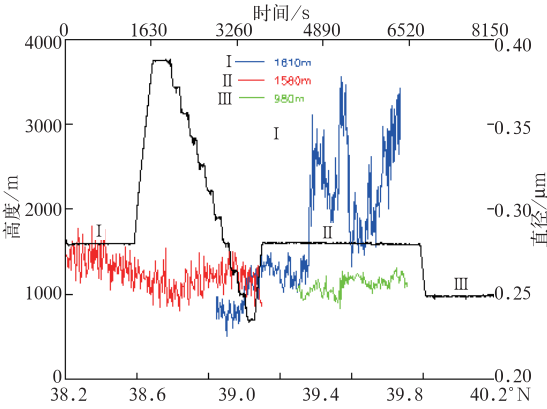


图 8 2005年4月17日气溶胶平均直径水平分布