

马新成, 吴宏议, 嵇磊, 等. 北京春季不同天气条件下气溶胶垂直分布特征[J]. 气象, 2011, 37(9): 1126-1133.

# 北京春季不同天气条件下气溶胶垂直分布特征<sup>\* 1</sup>

马新成<sup>1</sup> 吴宏议<sup>2</sup> 嵇磊<sup>1</sup> 张 菁<sup>1</sup> 黄梦宇<sup>1</sup> 李宏宇<sup>1</sup>  
杨道侠<sup>1</sup> 何 晖<sup>1</sup> 张 磊<sup>1</sup> 李睿劫<sup>1</sup> 刘力威<sup>1</sup> 韩 光<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京市人工影响天气办公室, 100089

<sup>2</sup> 北京市气象台, 100089

**提 要:** 对 2005 年和 2006 年北京地区春季没有沙尘和云影响下 17 次晴空大气气溶胶(粒径范围 0.1~3.0  $\mu\text{m}$ )飞机垂直观测资料进行分析, 给出了三种天气条件(地面高压、地面两高压之间和地面低压)下气溶胶的垂直分布, 并计算了对应天气条件下的风通量和理查森数。结果显示: 在北京地区处于地面高压控制下(简称类型 1), 气溶胶的垂直混合和水平传输都很强, 气溶胶浓度垂直分布平坦, 地面气溶胶浓度平均约为 1200 个/ $\text{cm}^3$ ; 在北京地区处于地面两高压之间(简称类型 2), 气溶胶的垂直混合较强, 边界层上没有阻挡, 气溶胶浓度随高度递减, 地面气溶胶浓度平均约为 7200 个/ $\text{cm}^3$ ; 在北京地区处于低压控制下(简称类型 3), 气溶胶在边界层顶垂直混合较弱, 形成一个较强的阻挡, 阻碍了气溶胶从边界层内向自由层扩散, 同时边界层内水平传输较弱, 结果是在边界层以上气溶胶浓度迅速递减, 地面气溶胶浓度非常高, 约为 10000 个/ $\text{cm}^3$ 。

**关键词:** 气溶胶浓度, 垂直分布, 飞机观测, 北京

## Vertical Distributions of Aerosols Under Different Weather Conditions in Beijing

MA Xincheng<sup>1</sup> WU Hongyi<sup>2</sup> JI Lei<sup>1</sup> ZHANG Qiang<sup>1</sup> HUANG Mengyu<sup>1</sup> LI Hongyu<sup>1</sup>  
YANG Daoxia<sup>1</sup> HE Hui<sup>1</sup> ZHANG Lei<sup>1</sup> LI Ruijie<sup>1</sup> LIU Liwei<sup>1</sup> HAN Guang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

<sup>2</sup> Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

**Abstract:** In this study, aerosol (0.1–3.0  $\mu\text{m}$ ) vertical distributions of 17 in-situ aircraft measurements during 2005 and 2006 springs are analyzed. The 17 flights are carefully selected to exclude dust events, and the analyses are focused on the vertical distributions of aerosol particles associated with anthropogenic activities. The results show that the vertical distributions of aerosol particles are strongly affected by weather and meteorological conditions, and 3 different types of aerosol vertical distributions corresponding to different weather systems are defined in this study. The measurement with a flat vertical gradient and low surface aerosol concentrations is defined as type-1; a gradually decrease of aerosols with altitudes and modest surface aerosol concentrations is defined as type-2; a sharp vertical gradient (aerosols being strongly depressed in the PBL) with high surface aerosol concentrations is defined as type-3. The weather conditions corresponding to the 3 different aerosol types are high pressure, between two high pressures, and low pressure systems (frontal inversions), respectively. The vertical mixing and horizontal transport for the 3 different vertical distributions are analyzed. Under the type-1 condition, the vertical mixing and horizontal transport were rapid, leading to a strong dilution of aerosols in both vertical and horizontal direc-

\* 北京市优秀人才培养项目(20081D0200800058), 北京市优秀人才培养项目(20071D0200800058)和国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403401)共同资助

2010 年 11 月 3 日收稿; 2011 年 5 月 24 日收修定稿

第一作者: 马新成, 主要从事气溶胶云降水物理和人工影响天气研究. Email: fellow\_007@163.com

tions. As a result, the aerosol concentrations in PBL (planetary boundary layer) were very low, and the vertical distribution was flat. Under the type-2 condition, the vertical mixing was strong and there was no strong barrier at the PBL height. The horizontal transport (wind flux) was modest. As a result, the aerosol concentrations were gradually reduced with altitude, with modest surface aerosol concentrations. Under the type-3 condition, there was a cold front near the region. As a result, a frontal inversion associated with weak vertical mixing appeared at the top of the inversion layer, forming a very strong barrier to prevent aerosol particles being exchanged from the PBL height to the free troposphere. Therefore, the aerosol particles were strongly depressed in the PBL height, producing high surface aerosol concentrations.

**Key words:** aerosol concentration, vertical distributions, aircraft measurements, Beijing

## 引言

北京是中国最大的城市之一,随着经济的发展和人口的增长,排入大气中的污染物急剧增加,产生了更多环境方面的严重后果,例如影响空气质量和能见度以及人类健康<sup>[1]</sup>,大气气溶胶的研究日益受到人们的关注。

大气气溶胶的飞机观测是一种重要的研究手段,其垂直分布特征研究是大气物理重点的研究领域。机载粒子探测系统 PMS (Partical Measurement System) 中的 PCASP 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。国外大气气溶胶粒子的飞机探测研究工作开展较多<sup>[2-5]</sup>。国内也于 1979 年长春<sup>[6]</sup>,1982 年西安<sup>[7]</sup>,1990 年石家庄<sup>[8]</sup>以及 1996、1997 年辽宁<sup>[9]</sup>,2005 年内蒙古<sup>[10]</sup>进行了飞机探测。

研究人员对北京地区的大气气溶胶的研究做了大量工作<sup>[11-17]</sup>,研究了北京地区大气气溶胶浓度与尺度谱的分布以及气溶胶的化学成分,但这些研究都局限于北京低空(400 m 以下)大气气溶胶分析,仍需要飞机、气球等进行探测,以期得到更完整的气溶胶粒子的时空分布。1982 年 4 月<sup>[18]</sup>和 1982 年 9 月<sup>[19]</sup>在北京进行的大气气溶胶飞机探测认为当有逆温存在时,常在其下边界附近形成气溶胶的“累积层”现象,但逆温对气溶胶产生的影响没有进行深入的分析;2005 年 4 月<sup>[20]</sup>对北京地区气溶胶只进行了个例分析,所搜集的飞机观测资料较少。

利用机载 PCASP 气溶胶探头对 2005 年和 2006 年北京地区春季没有沙尘和云影响下 17 次晴空大气气溶胶飞机垂直观测资料进行分析,给出了三种天气条件下春季气溶胶的垂直分布特征,同时计算了对应天气条件下的风通量和理查森数。

## 1 观测

### 1.1 飞机观测仪器

以夏延 IIIA 飞机为观测平台,飞行速度一般为 100 m/s,数据采集率为 1.0 帧/s,飞机进行垂直观测的飞行范围在 5 km 以内。飞机上安装有各种探测仪器,其中气溶胶粒子的测量是用美国 PMS 公司(美国科罗拉多州博尔德)机载粒子探测设备 PCASP-100X 进行的。该探头探测范围 0.1~3.0  $\mu\text{m}$ ,直径尺寸间隔从 0.02~0.5  $\mu\text{m}$  不等,分 15 个通道测量粒子个数,气体采样率为 1  $\text{cm}^3/\text{s}$ 。该探头每年在飞行使用之前都要在美国进行标定。飞行中同时测量温度( $T$ )、露点( $T_d$ )、气压( $p$ )和同步 GPS 飞行位置数据。

### 1.2 气溶胶粒子的垂直观测

2005 年和 2006 年春季在北京地区进行了大气气溶胶的飞机垂直探测。选取垂直探测期间晴天无云影响的气溶胶资料进行分析,总共选取春季个例为 17 个,表 1 给出个例选取的概况统计,其中 2005 年 9 次,2006 年 8 次。大气气溶胶飞机垂直探测地点都是北京北部昌平进行,保证个例选取的空间一致性。为了获得大气气溶胶垂直分布特征,飞机首先爬升到 3600 m 左右,然后逐渐下降到地面,垂直探测时间一般都为北京时间 11:30—14:00 之间,保证个例选取的时间一致性。

飞机垂直探测最高高度为 3600 m,在天气学上选取 700 hPa 对应约 3000 m 的高空做为分析影响高度,同时近地面气溶胶的分布是关心的重点,给出了地面天气形势背景。根据表 1 中给出的天气系统和天气形势,大气气溶胶的垂直分布分为三种分布

表 1 2005 和 2006 年北京春季飞机垂直探测信息  
Table 1 Information regarding the 17 flights during 2005 and 2006 springs in Beijing

年份	分布类型	个例编号	日期	垂直探测时间	天气形势	天气现象
2005 年	1	1	3 月 18 日	11:40—12:21	高空脊前西北气流,地面高压	晴,大风
	3	2	3 月 19 日	12:08—12:55	高空槽区偏西气流,地面两高压之间弱低压	晴,烟,微风
	1	3	3 月 22 日	11:26—12:09	高空槽后西北气流,地面高压前部	晴,大风
	3	4	3 月 27 日	11:53—12:36	高空西北气流,地面弱低压	晴,烟,静风
	2	5	3 月 30 日	12:12—13:03	高空脊前西北气流,地面鞍型场	晴,微风
	2	6	4 月 15 日	14:05—14:35	高空槽后西北气流,地面高压后部	晴,微风
	3	7	4 月 17 日	13:35—14:01	高空槽区偏西气流,地面低压前部	晴,烟
	3	8	4 月 18 日	13:10—13:37	高空低涡底部偏西气流,地面低压底部	晴,霾
	1	9	4 月 22 日	11:32—12:07	高空槽后西北气流,地面高压	晴
2006 年	3	10	3 月 20 日	12:14—12:45	高空西北气流,地面低压	晴,烟,静风
	3	11	3 月 31 日	12:56—13:29	高空偏西气流,地面低压	晴
	3	12	4 月 2 日	12:23—12:54	高空西北气流,地面低压底部	晴,烟
	2	13	4 月 3 日	10:35—11:07	高空弱槽前西南气流,地面倒槽	晴,霾
	2	14	4 月 26 日	12:46—13:19	高空横槽偏西气流,地面倒槽	晴
	3	15	4 月 29 日	11:40—12:06	高空西北气流,地面低压底部(冷锋前部)	晴,霾
	1	16	5 月 17 日	14:58—15:30	高空低涡底部偏西气流,地面高压	晴
	3	17	5 月 18 日	11:35—12:04	高空低涡底部偏西气流,地面低压	晴,烟

类型。类型 1 的天气条件一般为北京地区处于地面高压控制,天气现象为晴天,地面大风,风速  $8 \sim 10$  m/s,春季有 4 个个例(2005 年 3 月 18 日,2005 年 3 月 22 日,2005 年 4 月 22 日,2006 年 5 月 17 日)属于类型 1。北京地区处于两高压之间,天气现象为晴天,有微风,风速  $1 \sim 3$  m/s,定义受这样天气条件影响的气溶胶的垂直分布为类型 2,该类型春季有 4 个个例(2005 年 3 月 30 日,2005 年 4 月 15 日,2006 年 4 月 3 日,2006 年 4 月 26 日)。类型 3 的天气条件一般为北京地区处于弱低压或着低压系统控制,天气现象为晴天、静风,有 9 个个例(2005 年 3 月 19 日,2005 年 3 月 27 日,2005 年 4 月 17 日,2005 年 4 月 18 日,2006 年 3 月 20 日,2006 年 3 月 31 日,2006 年 4 月 2 日,2006 年 4 月 29 日和 2006 年 5 月 18 日)属于类型 3 的条件。图 1 给出三种类型下的典型天气形势图。例如 2005 年 3 月 18 日(图 1a)北京地区处于东南部高压系统控制中,结果是北京地区出现了西北大风天气,类型 1 的分布受这种天气形势的影响;2005 年 3 月 30 日(图 1b)北京地区处于两个高压(一个位于长江流域,另一个位于蒙古)之间,也就是鞍型场控制中,在这种天气形势下北京一般有微弱的北风,是类型 2 分布的典型天气形势;2005 年 4 月 18 日(图 1c)北京地区处于低压系统的底部,地面冷锋前部,是类型 3 分布的典型天气系统,在这种天气形势下常常会出现锋面逆温。当冷锋过境时,冷空气位于低层,而暖空气位于冷空气之上,这样就产生了逆温。这种稳定逆温的出现,就像一个盖子一样位于边界层顶,其结果就是大气污染被压缩在边界层内,很难突破逆温向上输送。

图 2 给出的是在三个不同天气条件下所测的大气气溶胶数浓度的垂直分布。结果显示,在受不同

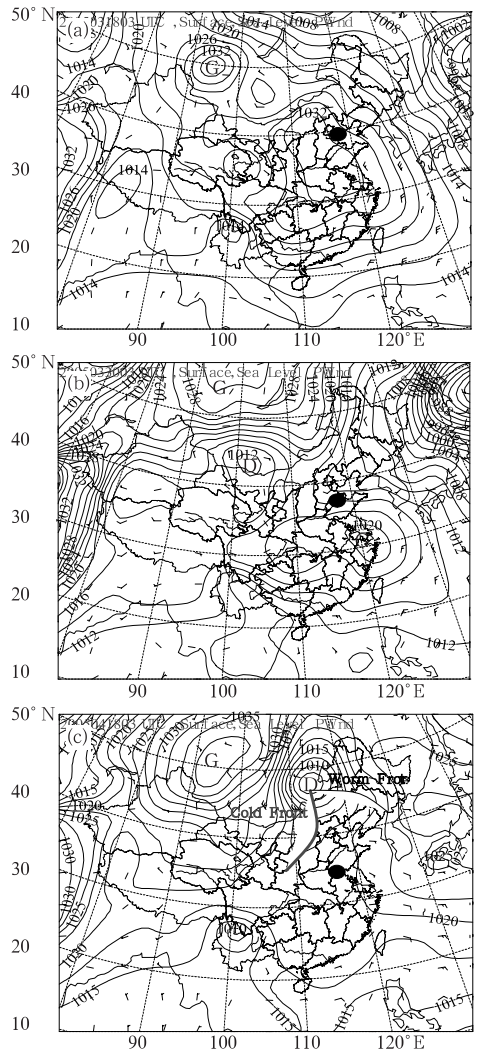


图 1 三种典型类型下的天气形势  
(a)2005 年 3 月 18 日;(b)2005 年 3 月 30 日;  
(c)2005 年 4 月 18 日(黑色圆圈为北京地区)  
Fig. 1 Three typical weather conditions

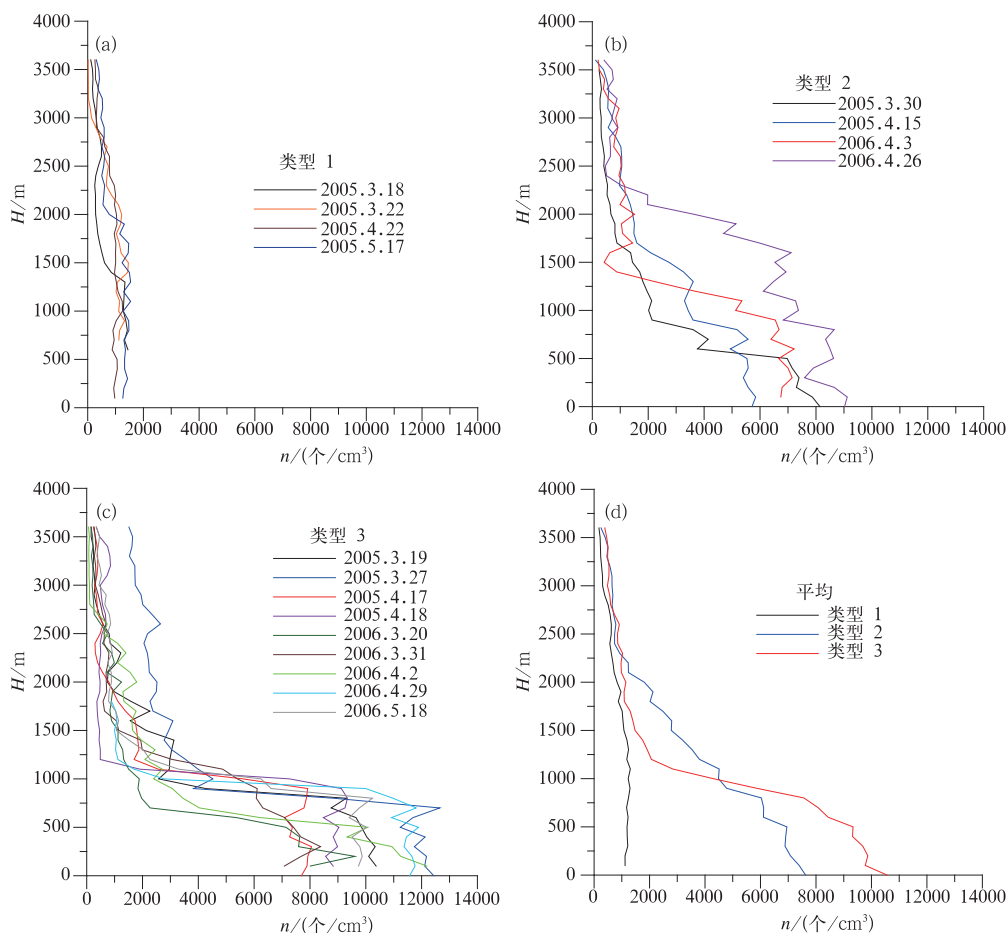


图 2 北京春季不同天气条件下气溶胶数浓度的垂直分布

(a)类型 1;(b)类型 2;(c)类型 3;(d)平均情况

Fig. 2 Vertical distributions of aerosol number concentration for

(a) type-1, (b) type-2, (c) type-3, and (d) averaged values

天气条件的影响下大气气溶胶数浓度的分布有不同的垂直分布特征。在类型 1 的天气条件下,气溶胶数浓度的垂直递减较小,在边界层内和自由大气层之间并没有出现急剧突变,地面气溶胶数浓度很低,范围在 1000~1500 个/cm<sup>3</sup> 之间,平均数浓度约为 1200 个/cm<sup>3</sup>。在类型 2 的天气条件下,气溶胶数浓度与在类型 1 条件下的相比出现大幅增加,范围在 8000~9000 个/cm<sup>3</sup>,之间,平均数浓度约为 7200 个/cm<sup>3</sup>;气溶胶数浓度随着高度迅速递减,出现很强的垂直递减梯度,例如在近地面到 2 km 之间气溶胶平均数浓度从 7000 个/cm<sup>3</sup> 递减为 2000 个/cm<sup>3</sup>。在类型 3 的天气条件下,地面气溶胶数浓度是这三种类型中最高的,范围在 7000~12000 个/cm<sup>3</sup> 之间,平均数浓度约为 10000 个/cm<sup>3</sup>,主要是由于逆温的存在,导致气溶胶数浓度在边界层与自由大气层之间出现剧烈变化的过渡层,例如气溶胶平均数浓度在 600 m 时(边界层高度为 700 m)为 9000 个/cm<sup>3</sup>,经过边界层顶之后

在 1500 m 时已经迅速递减为 1000 个/cm<sup>3</sup>。逆温的存在把气溶胶粒子分为两层。在边界层内气溶胶粒子出现均匀分布,低层气溶胶数浓度很高(8000~10000 个/cm<sup>3</sup>),在边界层之上的气溶胶粒子数浓度较低(300~1000 个/cm<sup>3</sup>)。

三种不同天气条件下的气溶胶数浓度出现不同垂直分布特征说明了气象条件对气溶胶的垂直分布有重要影响。下面分析了气溶胶垂直分布与气象条件之间的相互关系。

## 2 结果分析

### 2.1 气溶胶粒子质量和尺寸的垂直分布

通过 17 个个例得出的上面分析结果都是没有受到沙尘影响。根据 Zhang 等<sup>[1]</sup>在北京地区的观测结果显示,在沙尘期间,气溶胶粒子的半径通常都

是大于  $3.0 \mu\text{m}$ 。图 3 给出了三种不同条件下气溶胶粒子半径的垂直分布。观测到的气溶胶粒子半径一般都小于  $0.15 \mu\text{m}$ , 大部分粒子半径接近  $0.1 \mu\text{m}$ , 说明所观测的气溶胶粒子主要是由小粒子构成的, 主要来源于人为源的贡献, 所选的 17 个春季个例中受沙尘的影响几乎很小。气溶胶粒子半径的垂直分

布从地面到高空比较均匀, 变化梯度很小, 这与 Zhang 等<sup>[1]</sup>观测到的有沙尘影响的气溶胶粒子半径垂直分布不同, 在沙尘暴影响期间, 大尺寸的粒子一般都在边界层顶以上, 粒子半径随高度增加。通过对 17 个个例的粒子半径垂直特征分析显示气溶胶粒子主要来自于地面人为源。

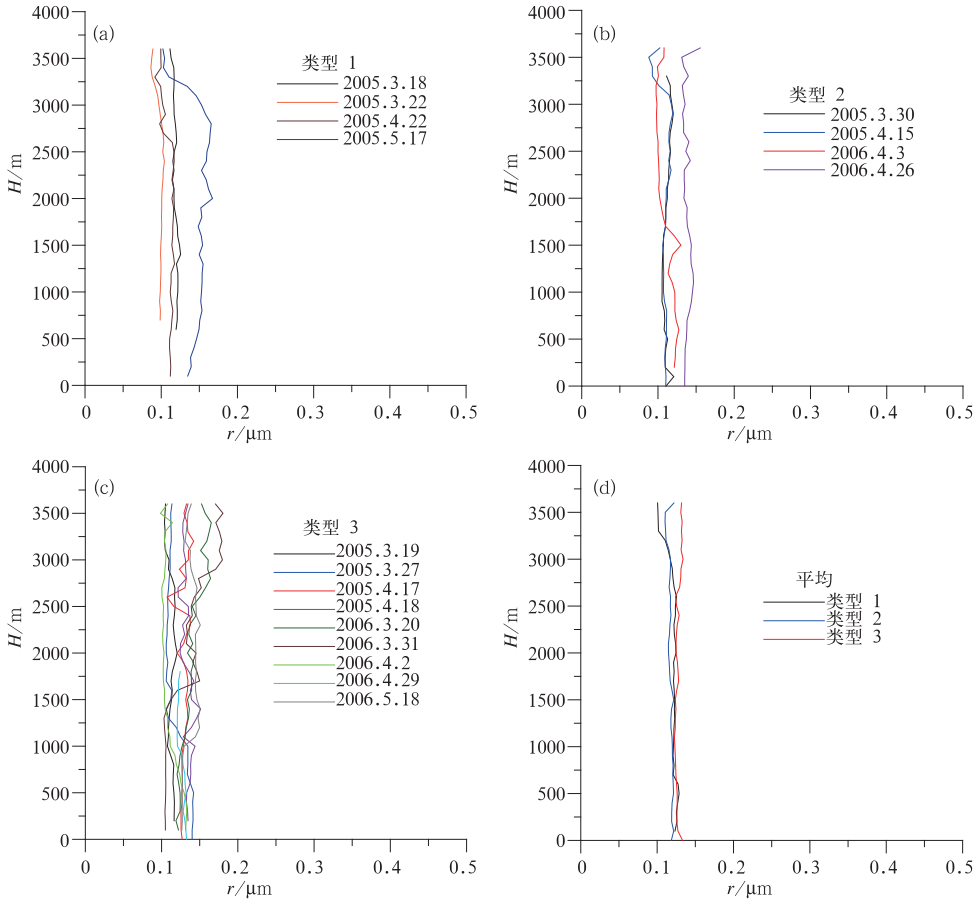


图 3 北京春季不同天气条件下气溶胶粒子半径的垂直分布

(a)类型 1; (b)类型 2; (c)类型 3; (d)平均情况

Fig. 3 Same as Fig. 2 except for aerosol radius (unit:  $\mu\text{m}$ )

估算气溶胶粒子的质量浓度的垂直分布。由于在观测期间没有对气溶胶的组成成分进行观测, 所以单个气溶胶粒子密度需要先估算出来以便用来计算气溶胶质量浓度。根据 Guinot 等<sup>[21]</sup>的研究, 在北京地区的气溶胶主要由有机物(52%)和硫酸盐粒子(28%)构成, 其次是氨(9%)、硝酸盐(8%)、烟(3%)等粒子构成。根据以上这些研究结果, 以及有机碳( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ), 硫酸盐( $1.7 \text{ g/cm}^3$ ), 氨( $1.7 \text{ g/cm}^3$ ), 硝酸盐( $1.7 \text{ g/cm}^3$ )和烟( $1.0 \text{ g/cm}^3$ )等气溶胶粒子的密度, 大量单粒子密度由下面公式来估算:

$$D_b = \sum 100/D_i P_i \quad (1)$$

式中,  $D_b$  代表大量单个粒子密度,  $D_i$  代表单个有机物、硫酸盐、氨、硝酸盐和烟粒子密度,  $P_i$  代表有机物、硫酸盐、氨、硝酸盐和烟在北京地区气溶胶质量浓度中所占的比例。根据以上的信息, 估算北京地区大量气溶胶粒子密度为  $1.73 \text{ g/cm}^3$ , 得出三种不同天气条件下近地面气溶胶粒子的平均质量浓度分别为  $9 \mu\text{g/m}^3$ ,  $52 \mu\text{g/m}^3$  和  $87 \mu\text{g/m}^3$ 。对应说明类型 1 是较低的大气污染, 类型 2 为中等大气污染, 类型 3 为重度大气污染。在类型 3 中由于逆温的存在, 导致大量气溶胶粒子压缩在边界层内, 最大气溶胶质量浓度常常超过  $100 \mu\text{g/m}^3$ 。根据 Deng 等<sup>[22]</sup>的研究认为当气溶胶细粒子质量浓度超过  $100$



$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,常常出现能见度很差的情况(能见度小于10 km)。进一步说明了天气条件对气溶胶数浓度和垂直分布的有着重要的影响。

## 2.2 气象条件对气溶胶垂直分布的影响

17 个个例中气溶胶粒子主要来源于地面人为源的释放(工业、交通和其他人类活动)。有三个重要因素影响气溶胶的垂直分布,首先是边界层内的湍流运动,来自近地面的气溶胶粒子在湍流作用下垂直混合,结果是气溶胶粒子被迅速地输送到边界层顶。Han 等<sup>[23]</sup>的研究认为一般在边界层顶存在“屏障”(很低的混合率),其阻止了气溶胶粒子从边界层向上输送到自由大气层。所以如果是弱的“屏障”的话会有更多的气溶胶粒子垂直输送到自由大气层里,相反如果是强的“屏障”则阻碍了气溶胶粒子从边界层垂直输送到自由大气层里,促使大量气溶胶粒子聚集在近地面内。第二个影响因素是风速,气溶胶从源区向其他地方输送主要取决于水平传输率,而水平传输率是由向上的风速量决定的。最后是气溶胶粒子浓度与边界层高度呈反相关,在很薄的行星边界层内,气溶胶粒子主要集中在边界层内。

从风向、风速的垂直分布中我们可以了解到更多有关边界层顶部垂直混合以及垂直混合阻挡情况。图4是三种典型天气条件下北京观象台P波段风廓线雷达获得的风的分布情况。从图4a(类型1)中可以看出在边界层内风速很大,在边界层顶附近风切变(风的垂直梯度)较小,这说明在边界层顶附近并没有很强的对垂直混合的阻挡存在。在类型2的情况下(看图4b),边界层内风速较弱,风的波动也较小比较平稳,说明由风波动引起的混合效果较弱。在边界层的顶部风切变较强,例如风速从近地面的5 m/s到1300 m增加到10~15 m/s,说明在边界层顶对垂直混合有弱的阻挡作用。在类型3的情况下(图4c),在边界层内几乎为静风,由于冷锋的影响边界层厚度不高,但是在浅的行星边界层内有很强的风切变,说明在边界层内有很强的垂直混合。有非常弱的风切变在边界层顶,对垂直混合有很大阻碍作用。风廓线雷达获得的风垂直结构提供了更多的气象信息,但是这些信息只是定性的没有做到定量。下面对三种类型垂直分布下混合和输送做定量的分析。

通过计算理查森数( $Ri$ )可以定量地知道边界层顶对垂直混合的阻挡情况。下面给出了它的计算

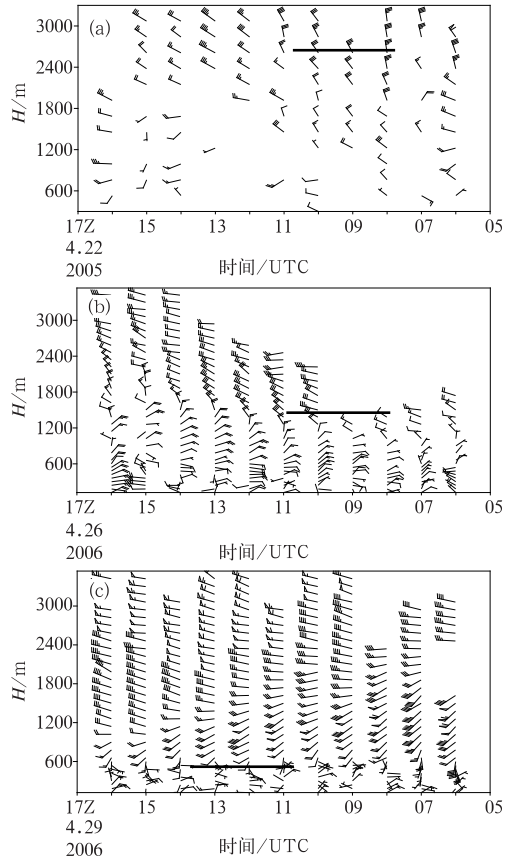


图4 北京春季三种典型天气条件下北京观象台P波段风廓线雷达资料  
Fig. 4 The vertical wind structures measured by wind profiler in the Beijing region for the 3 typical conditions

公式。 $g$ 为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ ), $L$ 为两层之间的厚度, $T_m$ 为所取两层空气绝对温度的平均值, $\Delta T$ , $\Delta u$ , $\Delta v$ 分别为两层间的温度和 $X$ 和 $Y$ 方向的风速。公式(2)给出的理查森数是热浮力和风切变之比。理查森数越低说明湍流和垂直混合强度越高,相反则越低。

$$Ri = \frac{g/T_m}{\Delta u^2 + \Delta v^2} \quad (2)$$

图5给出在三种不同天气条件下边界层顶理查森数。图5中的点划线是2005年4月22日(类型1)的温度廓线,可以看出在边界层顶(2500 m)处有一个中等的逆温存在,理查森数中等(0.59),有利于气溶胶粒子从边界层内向上输送到自由大气层内。图5中的虚线是2006年4月26日(类型2)的温度廓线,在边界层顶1600 m处存在一个很弱的逆温,此时的理查森数非常低(0.05),说明边界层顶的垂直混合非常活跃,气溶胶粒子很容易在边界层内和自有大气层之间进行交换。图5中实线是

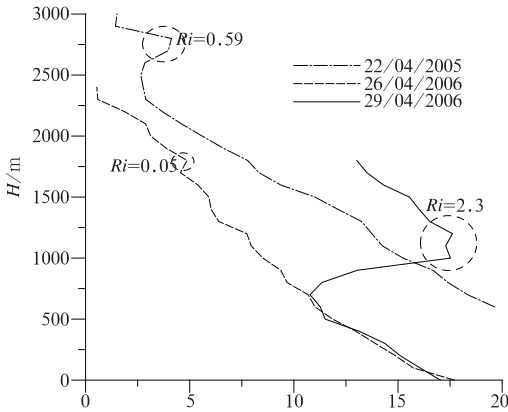


图 5 北京春季三种典型天气条件下边界层顶理查森数(点划线温度曲线对应图 4a,虚线温度曲线对应图 4b,实线温度曲线对应图 4c)

Fig. 5 The calculated  $Ri$  number at the top of the PBL height under 3 typical conditions

2006 年 4 月 29 日的温度廓线,在边界层顶处(700 m)有一个很强的逆温存在,理查森数很高达到了 2.3,很不利于气溶胶粒子从边界层向自有大气层输送,结果是大量气溶胶粒子被压缩在边界层内,造成了很强的气溶胶粒子垂直梯度。

除了理查森数外边界层高度和风速对气溶胶垂直分布也有着重要影响。Wu 等<sup>[24]</sup>的研究结果显示这两个因素可以合并成一个参数来研究,即风通量(Flux):

$$Flux = WH \quad (3)$$

风通量与气溶胶浓度有紧密的关系,用公式(3)来计算。其中  $W = (u^2 + v^2)^{1/2}$  是水平风速, $u$  和  $v$  是风速的  $X$  和  $Y$  方向风量, $H$  是边界层高度。图 6 是风通量和气溶胶数浓度之间相关图。从图中可以看出风通量越大气溶胶数浓度越低呈反相关,说明风通量在控制气溶胶数浓度上可能起着重要的作用。然后计算两者的相关性系数相对较低( $R = 0.53$ ),因为风通量只是影响气溶胶数浓度的其中因素之一。图 7 给出了三种不同类型下风通量、边界层高度、风速和边界层内气溶胶数浓度的平均值。在类型 1 情况中,平均风通量非常强( $16 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ),结果产生了较高的边界层高度(1800 m)和较强的风速(9 m/s)。由于较强的风通量的存在,有利于北京地区的气溶胶被传输到其他相邻地区,结果是北京地区气溶胶数浓度很低( $1.2 \times 10^3 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ),非常干净。在类型 2 情况中,平均风通量相对类型 1 要较低( $4.5 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ),相应地使边界层高度(1100 m)和风速(4.1 m/s)有所降低;弱的风通量不利于气溶胶粒子的向外输送,是北京地区出现

较高的气溶胶数浓度( $6.3 \times 10^3 \text{ 个}/\text{cm}^3$ )。在类型 3 情况下,平均风通量降低了更多( $3.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ),主要是由于边界层高度变低了(730 m),风速(3.8 m/s)与类型 2 相似,由于很低的风通量再加上在边界层顶存在较强的阻挡作用使气溶胶在水平和垂直方向传输很弱,导致北京地区近地面出现很高的气溶胶数浓度( $9.4 \times 10^3 \text{ 个}/\text{cm}^3$ )。

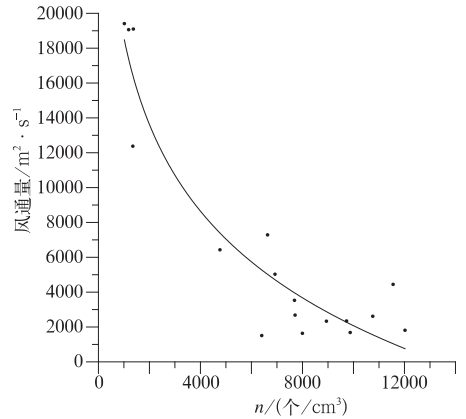


图 6 风通量( $\text{m}^2/\text{s}$ )和气溶胶数浓度( $\text{个}/\text{cm}^3$ )相关图  
Fig. 6 The relationship between the wind flux ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) and aerosol number concentrations ( $\#/\text{cm}^3$ )

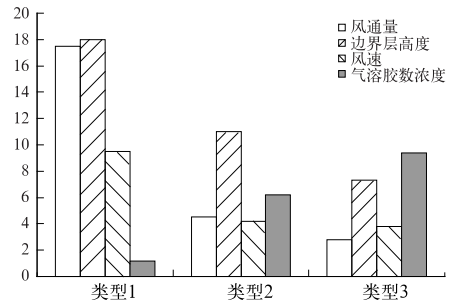


图 7 北京春季三种典型天气条件下风通量、边界层高度、风速和边界层内气溶胶数浓度的平均值  
风通量: $10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ,边界层高度: $10^2 \text{ m}$ ,风速: $\text{m}/\text{s}$ ,气溶胶总数浓度: $10^3 \text{ 个}/\text{cm}^3$

Fig. 7 The averaged values for the wind flux, the PBL height, averaged wind speed and aerosol number concentrations in the PBL for the 3 typical conditions

### 3 总结

北京是中国国际化的大城市之一,在过去的 20 年里经济迅猛发展,迅速增长的城市化可能会对与天气和气候有关的城市环境产生广泛的潜在后果,

比如高浓度粒子和很差的能见度。在过去的研究中,仅仅有少量的气溶胶垂直观测,急需更多的有关气溶胶垂直观测结果。本文分析了对2005年和2006年北京地区春季没有沙尘和云影响下17次晴空大气气溶胶飞机垂直观测资料进行分析,分析结论总结如下:

(1) 气溶胶粒子的垂直分布与天气形势密切相关。根据气象和天气条件,把气溶胶的垂直分布分为三种典型类型,这三种类型对应不同的天气形势。在类型1中气溶胶垂直分布变化不大,近地面气溶胶数浓度最低,这种类型的天气形势主要为北京地区处于高压控制中。在类型2中近地面气溶胶数浓度中等,随高度增加气溶胶数浓度逐渐递减,对应天气形势是北京地区处于两高压之间的弱低压中。在类型3中气溶胶数浓度几乎完全被压缩在边界层内,边界层顶附近出现迅速递减,对应天气形势是北京地区处于低压控制中,同时出现的锋面逆温在使气溶胶数浓度压缩在边界层内起着重要作用,结果使地面出现高气溶胶浓度。

(2) 分析了三种类型下气溶胶粒子的垂直混合和水平传输。结果显示在类型1中气溶胶的垂直混合和水平传输都很强,结果使气溶胶粒子在水平和垂直方向上迅速地被传输到其他地方,导致北京地区近地面气溶胶数浓度非常低,垂直方向上变化很小。在类型2中垂直并不弱,边界层内理查森数为0.05,边界层顶存在弱的阻挡,水平传输(风通量)属于中等强度,结果是气溶胶数浓度随着高度逐渐递减,近地面气溶胶数浓度较高。在类型3中垂直混合在边界层顶非常弱,形成了一个非常强的阻挡,阻碍了气溶胶粒子从边界层内向自有大气层传输,此外,水平传输不强,结果是气溶胶粒子被压缩在边界层内,地面出现很高的气溶胶数浓度。

## 参考文献

[1] Zhang Qiang, Zhao Chunsheng. Characterizations of aerosols over the Beijing Region: A case study of aircraft measurements[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 4513-4527.

[2] 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.

[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]. J Geophys Res, 1988, 93(D10): 12631-12644.

[4] Fouquart Y, Bonnel B, Brogniez G, et al. Observations of Sa-

harian aerosols: Results of ECLATS field experiment, Part I: Broadband radiative characteristics of the aerosols and vertical radiative flux divergence[J]. J Climate Appl Meteor, 1987, 26(1): 38-52.

[5] Isaac G A, Leitch W R, Strapp J W, et al. Summer aerosol profiles over Algonquin Park, Canada[J]. Atmos Environ, 1986, 20(1): 157-172.

[6] 游荣高, 任丽新. 大气气溶胶浓度与谱分布变化的研究[M]// 长春遥感实验论文集, 长春: 吉林人民出版社, 1981: 56-60.

[7] 何绍钦. 西安市一次晴空气溶胶粒子的观测分析[J]. 气象, 1978, 5: 19-22.

[8] 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): 40-43.

[9] 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[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 196-203.

[10] 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): 48-53.

[11] 徐敬, 张小玲, 颜鹏, 等. 2006年春季沙尘天气下背景地区大气气溶胶光学特性的观测研究[J]. 气象科技, 2008, 36(6): 697-685.

[12] 徐晓峰, 王京丽, 程存兰, 等. 2002年北京风沙季节颗粒物测值分析[J]. 气象科技, 2006, 34(6): 662-666.

[13] 游荣高, 洪钟祥, 吕位秀, 等. 边界层大气气溶胶浓度与尺度谱分布的时空变化[J]. 大气科学, 1983, 7(1): 88-94.

[14] 周明煜, 朱翠娟, 叶卓佳, 等. 北京城区秋冬季节气溶胶浓度分布规律及其与天气类型的关系[J]. 大气科学, 1983, 7(4): 450-455.

[15] 王明星, 吕位秀, 任丽新. 华北山区大气气溶胶的化学成分[J]. 大气科学, 1981, 5(2): 136-144.

[16] 杨东贞, 于海青, 丁国安, 等. 北京北郊冬季低空大气气溶胶分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特): 113-125.

[17] 王玮, 岳欣, 刘红杰, 等. 北京市春季沙尘暴天气大气气溶胶污染特征研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 494-498.

[18] 游来光, 马培民, 胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究[J]. 气象科技(增刊), 2002, 30: 52-53.

[19] 王明星, 任丽新, 吕位秀, 等. 大气气溶胶的粒度谱分布函数及其随高度的变化[J]. 大气科学, 1984, 8(4): 435-442.

[20] 黄海燕, 郑国光. 北京地区春季气溶胶分布特征的个例分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 3-7.

[21] Guinot B, Jean Claude R, Helene C, et al. Impact of vertical atmospheric structure on Beijing aerosol distribution[J]. Atmos. Environ. 2006, 40, 5167-5180.

[22] Deng X J, Tie X, Wu D, et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta Region (PRD)[J]. China Atmos Environ, 2008, 42, 1424-1435.

[23] Han S Q, Bian H, Tie X, et al. Impact measurements of nocturnal planetary boundary layer on urban air pollutants: from a 250-m tower over Tianjin, China[J]. J Hazard Mater, 2006, 162, 264-269.

[24] Wu D, Tie X, Li C C, et al. An extremely bad visibility event over the Guangzhou region: a case study[J]. Atmos Environ, 2005, 39, 6568-6577.