

郭凤霞, 戚俊, 2018. 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日北京气溶胶吸收特性分析[J]. 气象, 44(7): 921-928.

## 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日北京 气溶胶吸收特性分析\*

郭凤霞 戚俊

中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究部, 合肥 230088

**提 要:** 利用北京地区供暖期间 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日共计 37 d 的黑碳仪测量数据, 以气溶胶吸收 Ångström 指数(absorption Ångström exponent, AAE)和各种气溶胶特性之间的关系作为气溶胶组分指示器, 分析了北京冬季燃煤和交通排放对环境气溶胶组分的影响。37 d 平均(average)、清洁大气(clean)和雾-霾大气(fog-haze)三种天气状况下 AAE 的日变化特征及对比分析结果显示: average 和 fog-haze 状况下的 AAE 均在交通高峰时段达到最小值, 在其他时段相对增大; clean 状况下的 AAE 则从夜间到白天逐渐减小, 在交通高峰时段出现相对变小的拐点; AAE 在 clean 状况下明显高于其他两种天气状况, 且在夜晚差值增大。结合各种天气状况下的气象条件的变化, 证明了北京冬季夜间燃煤时段含有褐碳气溶胶的较高排放和交通时段细颗粒物的显著增加, 及两者对大气环境中气溶胶组分变化的重要影响。

**关键词:** 大气气溶胶吸收系数, 大气气溶胶吸收 Ångström 指数(AAE), 黑碳气溶胶, 褐碳气溶胶

中图分类号: P427, X511

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.007

## Analysis of Aerosol Absorption Properties in Beijing from 13 November to 19 December 2009

GUO Fengxia QI Jun

Institute of Applied Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230088

**Abstract:** The effects of traffic emission and heating in winter on the components of atmospheric aerosol were revealed by using the relation between the properties of aerosol and the aerosol absorption Ångström exponent (AAE) as the indicator for the aerosol's composition, based on a 37 d measurement campaign from 13 November to 19 December 2009 with the Aethalometer in the region of Beijing. The diurnal variation characteristics and the comparison analysis were studied on the 37 d average, clean, and fog-haze conditions. The results showed that the AAE reached the minimum during traffic rush-hours and increased at other times in the average and fog-haze conditions. In clean condition, the AAE decreased gradually from nighttime to daytime, and an inflexion would turn with the advent of the traffic rush-hours. The AAE was significantly higher in clean condition than in the two other conditions, and the difference became more significant at night. Combining the varied weather conditions, the paper demonstrated that significant emissions of brown carbon-containing aerosols in the region of Beijing in winter, especially during the night, and emissions of the fine particles during traffic rush-hours, as well as the important impact on the components of aerosol in ambient atmosphere.

**Key words:** absorption coefficient of atmospheric aerosol, absorption Ångström exponent (AAE) of atmospheric aerosol, black carbon aerosol, brown carbon aerosol

\* 国家自然科学基金青年科学基金项目(11504383)资助

2017 年 1 月 7 日收稿; 2018 年 4 月 23 日收修定稿

第一作者: 郭凤霞, 主要从事激光大气传输和大气气溶胶特性的研究. Email: guofengxia@126.com

## 引 言

近年来,我国雾-霾问题日益加重,雾-霾发生频次逐年增加,现今的雾和霾已不是完全的自然现象,其主因是严重的人为气溶胶污染(张小曳等,2013)。大量煤炭、化石燃料和生物质的燃烧及各种工业和交通排放,产生的污染气体大幅度增加,带来了日益突出的雾-霾天气和持续性霾过程。特别是在我国北方城市冬季供暖期间,燃煤成为大气颗粒物的重要来源,在一定的气象条件下,容易造成大范围、持续性雾-霾天气。煤炭等燃烧产生的含碳气溶胶含有大量致癌多环芳烃及光吸收物质(Andreae and Gelencsér, 2006),已成为影响空气质量的首要污染物,直接影响到人类生存环境和人体健康,且显著地影响了光化学作用、气溶胶辐射强迫以及全球辐射平衡等,在促使全球变暖方面也具有重要作用(Jacobson, 2004)。因此,评估燃烧气溶胶对环境空气中悬浮粒子的贡献至关重要。各种研究表明了冬季燃烧对大气污染的重要性(张仁健等,2002; Puxbaum et al, 2007; Favez et al, 2009)。

在全球,我国气溶胶浓度水平较高,加强对我国尤其是一些人口高度聚集和工商业快速发展区域的大气气溶胶分布和变化情况的观测分析,进而合理、准确地研究其对环境与气候的可能影响,具有重要的意义。我国幅员辽阔、自然环境复杂,在全国大范围内进行长期、系统的观测很难实现,而选择一些地域、气候等具有代表性的地区进行观测分析,获取典型地区规律性的认识,是目前常用的手段(黄印博等,2007; 廖礼等,2015; 邓玉娇等,2016; 姚青等,2016; 张悦等,2016)。北京市位于华北平原的北部边缘,地处内蒙古高原、黄土高原和华北平原交界处,为半干旱、半湿润的地区。多年平均风速为  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,容易出现地面扬尘,而且稳定类型天气出现频率较高,不利于大气污染物扩散,是我国雾-霾高发地区之一,特别是在冬季供暖期间,大气污染尤为严重。因此,北京地区大气颗粒物的特性一直受到众多研究人员的关注(娄淑娟等,2005; 何心河等,2016; 郭伟等,2016)。本研究选择北京地区为观测点,观测分析冬季供暖期间大气气溶胶质量浓度、吸收系数和吸收 Ångström 指数 (absorption Ångström exponent, AAE),研究不同天气各个时段气溶胶在不同波段的吸收特性对大气颗粒物的来

源及组分的解析作用,以了解北京地区空气中气溶胶粒子的光学特性和冬季燃煤对气溶胶组分的影响,为有效开展污染控制提供一定的参考。

## 1 环境空气监测和分析方法

光学分类中,大气含碳气溶胶的光吸收碳部分可以进一步被划分为黑碳(BC)和褐碳(BrC),根据热-化学分类,它们分别对应于元素碳(EC)和有机碳(OC)的吸收部分(Andreae and Gelencsér, 2006)。黑碳气溶胶是指悬浮在大气中的黑色碳质颗粒物,主要是含碳物质在不完全燃烧过程中产生的一种无定型碳质,其在气候相关的整个太阳光谱波段范围(比如近红外—可见光—紫外)都具有强烈的吸收作用,并从长波到短波稳健的增长,是大气气溶胶中最主要的吸光物质,除去一些特殊的天气状况(如沙尘、扬尘),对气溶胶光学吸收系数的贡献率在  $90\% \sim 95\%$  以上。因此,测量的实际大气气溶胶的吸收系数一般可作为黑碳气溶胶的吸收系数。褐碳是一种由多种子组分组成的多相复杂的混合物,每种子组分可能具有不同的光学吸收特性,与黑碳具有本质的区别,其在可见光波段的吸收可以被忽略,但是在更短波段(紫外)急剧增加。气溶胶的光吸收通常和参数  $\lambda^{-A}$  成正比,其中  $\lambda$  是光波长(单位:  $\text{m}$ ),  $A$  即 AAE(Favez et al, 2009)。气溶胶吸收的波段依赖性通常由 AAE 定量给出:

$$\alpha_{\text{abs}} = K\lambda^{-A} \quad (1)$$

式中,  $\alpha_{\text{abs}}$  为气溶胶吸收系数(单位:  $\text{m}^{-1}$ ),  $K$  是一个和质量浓度有关的参量。式(1)从近紫外到近红外的光谱吸收都适用。黑碳气溶胶光吸收的波段依赖性较低( $A$  近似为 1),即其 AAE 几乎不随波段发生变化;褐碳的 AAE 较高,在  $1.5 \sim 7.0$  范围内变化(Hoffer et al, 2006),其值大小与波段的改变有很大关系。因此,成分复杂的大气气溶胶的 AAE 具有波段依赖性。最新的研究表明,在城市环境下,大气气溶胶的 AAE 主要受含碳气溶胶化学特性的影响(Lewis et al, 2008; Flowers et al, 2010),这提高了利用分析的 AAE 作为气溶胶组分指示器的可能性。

分析数据来源于安装在北京南五环的由美国 Magee 科技公司生产的黑碳气溶胶监测仪(AE31, 以下简称黑碳仪)。黑碳仪的工作原理是利用石英滤纸带上收集的气溶胶粒子对光的吸收造成的衰

减,属于光学灰度测量法,可实时监测七个波段(370,470,520,590,660,880和950 nm)黑碳气溶胶的质量浓度,并可利用黑碳气溶胶对光的吸收特性,测量实际大气气溶胶的吸收系数,其值等于质量浓度和气溶胶在各个波段上的质量吸收截面(其值从370~950 nm波段分别为39.5,31.1,28.1,24.8,22.2,16.6和15.4  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )的乘积。仪器的详细工作原理及资料处理方法见网站(www.mageesci.com)。按照仪器使用操作规程,在试验前先行进行检漏、流量测试、零气测试及运行程序测试等,保障仪器的准确性和稳定性。实际测量过程中,黑碳仪由一台电脑及相应的数据采集程序控制,除断电、换膜等客观原因发生中断外,将连续抽取环境空气进行观测,实时测量全部气溶胶的黑碳质量浓度(单位: $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ),每采集5分钟得到1组平均数据。对实测数据每5点求取均值和均方差,均值上下浮动在均方差范围内的数据认为是有效值,基于该原则进行有效数据的筛选。

## 2 结果分析

### 2.1 黑碳气溶胶质量浓度和吸收系数的统计分析

2009年11月13日至12月19日黑碳仪进行了为期37 d的大气气溶胶光学特性连续测量试验。试验期间天气状况复杂多变,11月14日凌晨左右出现了西北偏北的大风天气,风速达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,有利于污染物的扩散,此后4 d内天气晴朗,阳光充足,空气清洁,能见度也比较高(平均每天达

到25~30 km),气溶胶吸收系数大部分位于 $10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 量级;18日开始风速减小,风向变化无常,空气逐渐变得浑浊,这主要是由于本地细颗粒污染物的堆积造成的高浓度污染;29日出现大雾天气,期间和此后数天内空气质量一直处于较差状态,直至12月5日又转为晴朗天气,之后阴、晴交替,天气变化繁复。根据黑碳仪所测37 d的黑碳气溶胶质量浓度(图1,以370 nm波段为例)以及计算的气溶胶吸收系数可知,两者在多数天气具有非常明显的日变化特征,基本上每日午后时段黑碳浓度和吸收系数达到最小值,早晨和夜晚时段数值较大,表明北京环境空气主要受当地气溶胶源的影响而非长距离传输气溶胶。11月14、24日和12月2、11、17日为大风天气(图中方框标出大风起始点),11月25、26日和12月4、9、10日均为阴天,情况比较特殊,吸收系数午后时段并非最低,全天日变化特征也不太明显。其中比较严重的持续性雾-霾天气由灰色阴影框出,某些时段黑碳浓度高达 $50000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。图2展示了11月13—17日大风天气前后共计5 d两个波段的气溶胶吸收系数变化情况,来自内蒙古草原的强劲西北偏北大风吹散了北京上空聚集的颗粒物,气溶胶吸收系数急剧下降,变化范围达到1~2个量级,并在此后数天一直维持在较低水平。

为得到北京冬季气溶胶平均分布概况,对黑碳质量浓度和吸收系数做平均:首先对每小时内的数据进行平均,得到小时平均数据;然后对37 d同一时刻的数据进行平均,共得到24组小时平均结果,图3分别给出了2009年11月13日至12月19日平

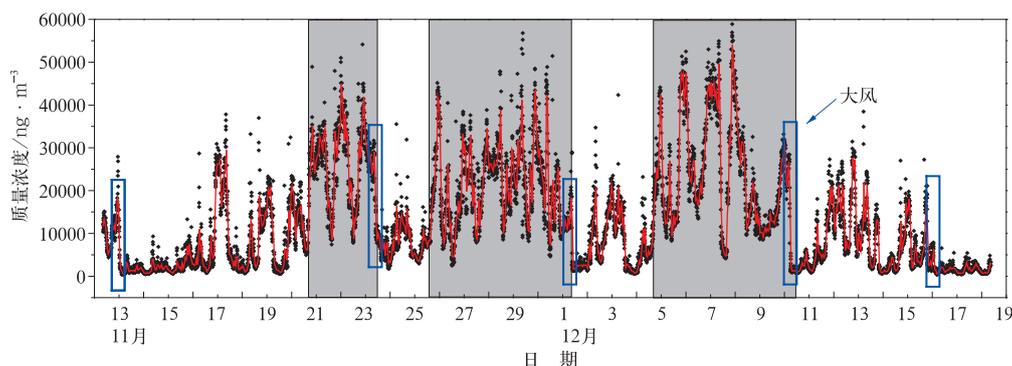


图1 2009年11月13日至12月19日北京实测(黑点)及小时平均(红线)气溶胶质量浓度变化特征

Fig. 1 Variations of measured (black dots) and hourly average (red line) of aerosol mass concentration from 13 November to 19 December 2009

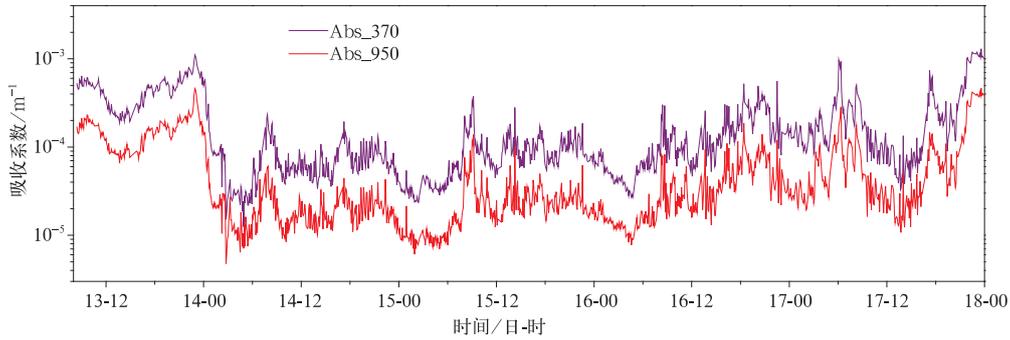


图 2 2009 年 11 月 13—17 日的北京气溶胶吸收系数变化特征

Fig. 2 Variations of aerosol absorption coefficient in Beijing during 13—17 November 2009

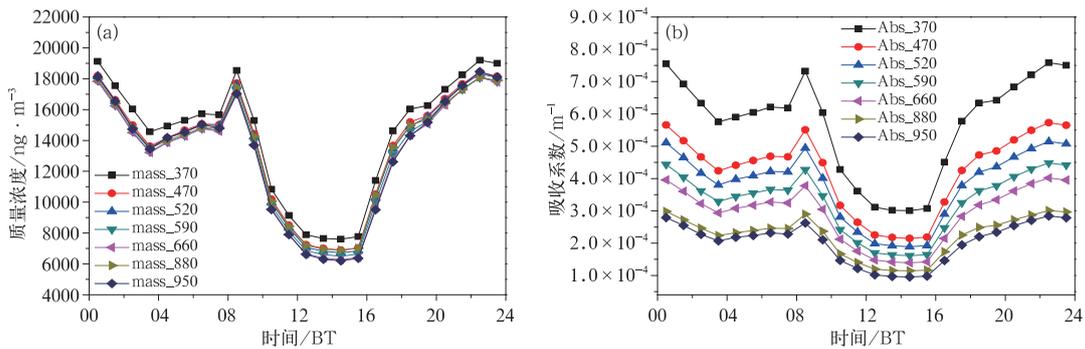


图 3 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日北京气溶胶平均质量浓度(a)和吸收系数(b)日变化特征

Fig. 3 Averaged diurnal variations of aerosol mass concentration (a) and absorption coefficient (b) in Beijing from 13 November to 19 December 2009

均的质量浓度(图 3a)和吸收系数(图 3b)的日变化特征。由图可知,黑碳仪 7 个波段的质量浓度和吸收系数都随波长的增大逐渐减小,日变化规律基本一致,呈现双峰结构,即早晨和夜晚数值较大,而在午后达到最小,吸收系数的最大值与最小值相差 2 倍以上。质量浓度和吸收系数都在 08:30 和 22:30 左右出现峰值,在 370 nm 波段分别达到了  $18540 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  以及  $7.32 \times 10^{-4}$  和  $7.59 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。这些特征与北京的天气气候特点相吻合。早晨日出后由于太阳辐射不断加强,大气温度逐渐升高,但冷的地面升温较慢,造成了清晨大气逆温现象,污染物不易扩散,因此大气气溶胶浓度和吸收系数较高(张美根等,2005);而午后的低值,则是由于大气对流活动增强和边界层抬升而使混合层高度达到最高而形成的(王庚辰等,1998);日落以后随着夜间的向前推移,由于地面辐射降温,低层大气逐渐变为稳定边界层,近地面风速常常减弱或静风,污

染物很少在垂直方向上扩散,大气气溶胶在近地面开始积累,从而浓度迅速升高,并在夜间继续富集,因而维持较高浓度水平,并在 22:30 达到高峰;午夜时段由于污染源排放(汽车尾气和燃煤)大大减少,因此富集的气溶胶逐渐扩散,质量浓度和吸收系数逐渐下降。除了上述天气扩散日变化规律外,早晚交通高峰时段汽车尾气排放和冬季夜间供暖燃煤也对大气气溶胶有很大程度的贡献。值得一提的是,在 18:30 左右各个波段的质量浓度和气溶胶吸收系数都出现了一个较为明显的拐点,体现了傍晚交通高峰时段汽车尾气排放对大气气溶胶的影响。

图 4 中以 370 nm 波长为例,统计了 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日吸收系数的概率(图 4a)和累积概率(图 4b)分布情况。吸收系数的量级大部分在  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ,极少数出现在  $10^{-3} \text{ m}^{-1}$  量级,近 60% 的吸收系数在  $10^{-4} \text{ m}^{-1}$  的量级,21% 左右的吸收系数在  $10^{-5} \text{ m}^{-1}$  量级。

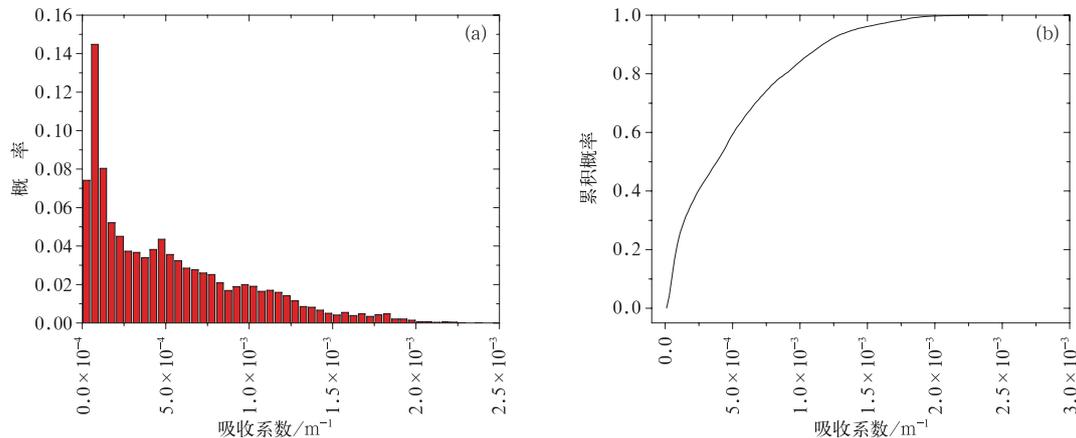


图 4 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日吸收系数概率(a)和累积概率分布(b)  
Fig.4 Probability (a) and cumulative probability (b) of absorption coefficients  
from 13 November to 19 December 2009

针对 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日不同天气情况,选择大风之后黑碳浓度明显下降的天气作为清洁大气,将黑碳浓度持续数天且维持较高浓度水平的天气作为雾-霾大气,对比分析试验期间 37 d 平均(average)、清洁大气(clean)和雾-霾大气(fog-haze)三种情况下的黑碳气溶胶平均质量浓度和吸收系数日变化特征(图 5,以 370 nm 波段为例,图中

的误差线为标准偏差,为方便查看,分别采用了上误差线,下误差线,或者上下误差线,下同),以及它们的均值和标准偏差(表 1)。三种大气状况下质量浓度均值分别为  $14402 \pm 3947$ 、 $2444 \pm 740$  和  $20725 \pm 5717 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ;气溶胶吸收系数分别为  $(5.69 \pm 1.56) \times 10^{-4}$ 、 $(0.96 \pm 0.29) \times 10^{-4}$  和  $(8.19 \pm 2.25) \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。数次出现西北偏北风向的大风之后,

表 1 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日 average, clean 和 fog-haze 质量浓度  
和吸收系数及其标准偏差的平均值和变化范围

Table 1 Mean value and variation range of mass concentration and absorption coefficient and the standard bias of average, clean and fog-haze in Beijing from 13 November to 19 December 2009

	质量浓度/ $10^3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$		标准偏差/ $10^3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$		吸收系数/ $10^{-4} \text{ m}^{-1}$		标准偏差/ $10^{-4} \text{ m}^{-1}$	
	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
average	14.40	7.61~19.20	10.62	5.28~15.33	5.69	3.00~7.58	4.19	2.08~6.05
clean	2.44	1.11~3.76	1.15	0.40~2.04	0.96	0.44~1.48	0.45	0.16~0.80
fog-haze	20.73	11.03~28.17	9.98	5.04~15.07	8.19	4.36~11.10	3.94	1.99~5.95

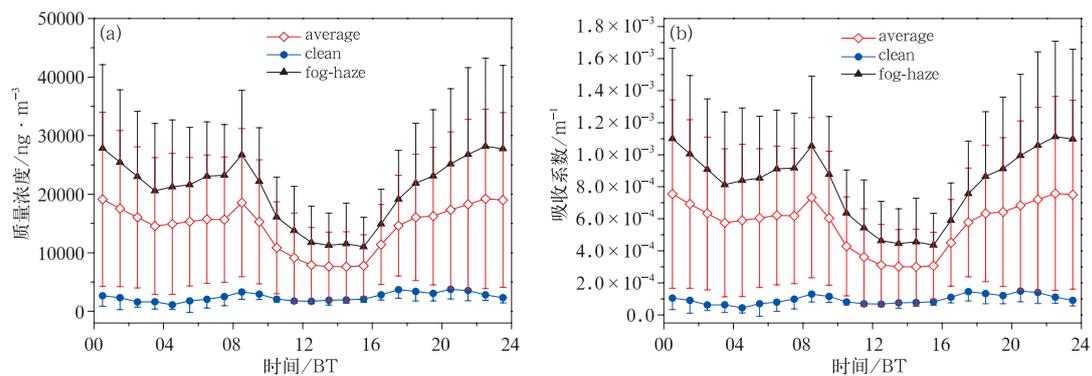


图 5 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日 average, clean 和 fog-haze 质量浓度(a)和吸收系数(b)日变化特征  
Fig.5 Averaged diurnal variations of mass concentration (a) and absorption coefficient (b)  
of average, clean and fog-haze from 13 November to 19 December 2009

都会带来内蒙古草原比较清洁的空气,因此 clean 大气下的黑碳气溶胶质量浓度和消光系数比其他两种天气状况显著降低,平均几乎仅为雾-霾天气下的十分之一,由此可见雾-霾给北京带来的环境空气污染程度之重;雾-霾天气状况与 37 d 平均的质量浓度和消光系数日变化特征非常相似,其值大小也较为接近,这主要是由于试验期间雾-霾天气较多,对大气成分平均状态贡献较大所致。

## 2.2 吸收 Ångström 指数和气溶胶组分关系分析

如前所述,在城市环境下,AAE 主要受含碳气溶胶化学特性的影响,AAE 及其波段依赖性都可以作为碳颗粒物的化学选择性参数,具有气溶胶组分指示器的功能。前面分析的气溶胶质量浓度及吸收系数给出了各种天气状况下北京环境空气中气溶胶的总体变化概况和平均日变化特征,为更进一步了解冬季供暖燃煤和交通排放等各种源释放对雾-霾天气的贡献,利用此研究试验期间的 AAE 的变化特征,分析在各种天气条件和不同时段大气颗粒物

中黑碳和褐碳气溶胶及细颗粒物含量的变化情况。

由于褐碳在紫外波段的吸收急剧增加,而含有褐碳气溶胶的可能主要排放源是煤炭和生物质燃烧,为观察北京冬季燃煤的影响作用,特别分析黑碳仪最短波段 370 nm 和其他波段根据式(1)计算的 AAE( $A_{370\text{ nm}-\lambda}$ ),结果表明, $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  对于北京冬季颗粒物污染组分分析具有更好的指示作用。图 6a~6c 分别展示了在三种天气状况 37 d 平均的  $A_{370\sim 950\text{ nm}}$  和  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  的日变化特征(其他对比结果不再列举)。三种天气状况下, $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  都明显大于  $A_{370\sim 950\text{ nm}}$ ,并表现出较大的变化幅度,反映处于较短波段的  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  对外界排放粒子的组分变化更为敏感。进一步,分析以  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  作为指示大气气溶胶组分变化特征的主导参数,并在图 6d 中特别给出三种天气状况下  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  的对比结果。

由于雾-霾天气较多,因此在 average 和 fog-haze 两种天气状况下,AAE 变化较为相似,均在交通高峰时段获得最小值,说明交通排放使气溶胶质量浓度增加到最大值,但改变了环境空气中气溶胶

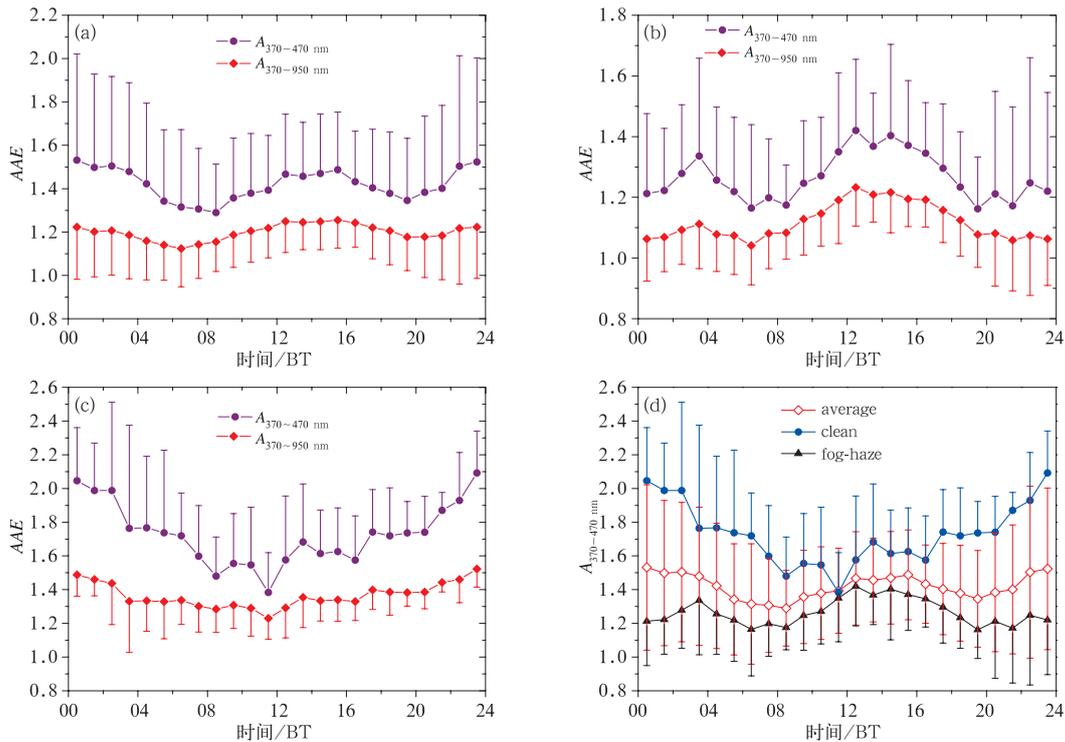


图 6 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日 average(a), fog-haze(b) 和 clean(c) 的 AAE 日变化特征及三种天气下  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  对比(d)

Fig. 6 Averaged diurnal variations of absorption Ångström exponent (AAE) of average (a), fog-haze (b) and clean (c) and the comparison of  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  (d) in different weather conditions from 13 November to 19 December 2009

的化学组成,AAE 则敏感地反映了气溶胶组成的这种变化。已有研究表明,AAE 和 OC/EC 比率具有较好的正相关性,并与细颗粒物的浓度呈现完全相反的关系(Favez et al, 2009)。因此,在交通时段 AAE 的减小说明了汽车新鲜排放的细颗粒物具有较低的 AAE;同时,新气溶胶的增加减小了褐碳粒子在大气气溶胶中所占的比例,进一步降低了大气中气溶胶的总 AAE。而在 clean 天气状况下 AAE 变化趋势和上述两者较为不同,其从夜间到白天逐渐减小,并在午后直至夜间又逐渐增大,交通时段出现的拐点也说明了其具有一定的影响。原因在于,在 clean 大气气象条件下,白天的大气污染物扩散迅速,环境空气中的褐碳含量也大为减少,AAE 具有较小值;夜间则由于供暖燃煤排放,大气中的褐碳含量增加,而夜晚较小的风速和静稳的边界层等气象条件使其不易扩散,从而在近地面逐渐积累,浓度也升至较高水平,AAE 也逐渐增加到较大值,非黑碳性气溶胶影响显著。特别需要指出的是,在 clean 和 fog-haze 两种天气状况下 AAE 的对比情况,AAE 在 clean 天气明显高于 fog-haze 天气,并且两者在白天差值较小,而在夜晚具有较大差值。这已不能单纯利用气溶胶总浓度来进行解释,分析更应该引入 OC/EC 比率的概念。无论是在 fog-haze 还是 clean,夜晚特殊的边界层条件都易造成气溶胶的堆积,而在 clean 天气状况下,由于其他类型颗粒物相对较少,燃煤新鲜排放的含有褐碳气溶胶所占比率较高,OC/EC 比率较大,与之形成较好正相关性的 AAE 就会具有较大值。以上分析都充分证明了北京冬季夜间燃煤时段含有褐碳气溶胶的重大排放,及其对大气环境中气溶胶组分变化的影响。

图 7 比较分析了大气气溶胶急剧减小和增加时段吸收系数和 AAE 的实时变化特征。11 月 14 日凌晨北京为西北偏北大风,气溶胶吸收系数急剧减小,AAE 则迅速增大,其原因在于霾天气的各种颗粒物被迅速吹散,冬季夜晚燃煤产生的含有褐碳颗粒物相对占有较大比率,导致 AAE 总体呈上升趋势,并在气溶胶浓度达到一定较低的稳定状态时,AAE 维持相对平稳的较大值;17 日 21 时左右,由于外界气象条件的变化,颗粒物逐渐积聚,气溶胶吸收系数迅速增大,进入霾天气,与此同时,AAE 整体出现下降趋势,反映出在霾天气细颗粒物及其他非褐碳成分的增加。但气溶胶吸收系数和 AAE 并不是单纯的相反关系,气溶胶吸收系数主要和大气吸收性颗粒物浓度(主要以黑碳和褐碳为主)有关,而 AAE 和气溶胶化学组成有很大关系,主要由褐碳气溶胶浓度和其所占比率及细颗粒物占比情况等参数共同决定。如在比较稳定的时段,气溶胶吸收系数变化不大,但 AAE 也会存在一定的起伏,这反映出在气溶胶总量变化不大的情况下,由于一天内人类活动的影响,气溶胶化学组分存在一定的变化。

### 3 结论和讨论

基于七波段黑碳仪于 2009 年 11 月 13 日至 12 月 19 日在北京进行的为期 37 d 的大气气溶胶观测试验数据,本文研究了在这个典型地区冬季供暖期间不同天气条件不同时段气溶胶在各个波段的吸收特性,初步分析了大气颗粒物中黑碳和褐碳气溶胶及细颗粒物含量的变化特征,研究结果反映了冬季燃煤和交通排放对环境空气中悬浮粒子的影响。

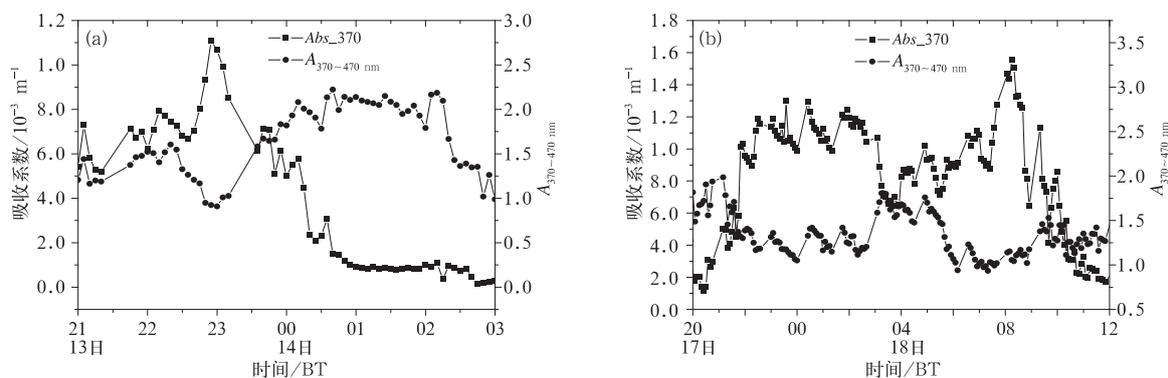


图 7 2009 年 11 月大气气溶胶急剧减小(a)和增加(b)时段吸收系数和  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  对比

Fig. 7 Comparison of absorption coefficient and  $A_{370\sim 470\text{ nm}}$  during the decreasing stage (a) and increasing stage (b) of atmospheric aerosol

(1) 黑碳仪 7 个波段的质量浓度和吸收系数都随波长的增大逐渐减小,日变化规律基本一致,呈现双峰结构,并且吸收系数的最大值与最小值相差 2 倍以上,反映了该地区人为活动和大气扩散日变化规律等对环境空气颗粒物的影响。针对试验期间不同天气情况,分析得到了 37 d average、clean 和 fog-haze 三种天气状况下气溶胶平均质量浓度和吸收系数日变化特征。clean 大气下的气溶胶质量浓度和消光系数比其他两种天气状况显著降低,平均几乎仅为雾-霾天气下的十分之一,由此可见雾-霾给北京带来的环境空气污染程度之重。

(2) 基于黑碳和褐碳气溶胶光吸收波段依赖的差异性,利用 AAE 作为气溶胶组分指示器,观察分析了北京冬季燃煤及交通排放对环境气溶胶组分的影响作用。37 d average、clean 和 fog-haze 三种天气状况下 AAE 的日变化特征,充分证明了北京冬季夜间燃煤时段含有褐碳气溶胶的重大排放和交通时段细颗粒物的显著增加,以及两者对大气环境中气溶胶组分变化的影响。

由于缺乏更多的气象参数和其他气溶胶光学及微物理特性观测参量,以上主要研究了气溶胶的吸收特性,并定性分析了含碳气溶胶和细颗粒物在不同天气条件及不同时段的变化特征;以后可根据条件开展多台气溶胶监测仪器综合观测试验,定量解析燃煤和交通排放对大气碳质气溶胶的贡献比例。

**致谢:**感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室朱文越和黄印博提供实验数据和撰文指导。

## 参考文献

邓玉娇,胡猛,林楚勇,等,2016. 基于 FY3A/MERSI 资料分析广东省气溶胶光学厚度分布[J]. 气象,42(1):61-66.

郭伟,卜令兵,贾小芳,等,2016. 基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析[J]. 气象,42(12):1540-1546.

何心河,马建中,徐敬,等,2016. 2014 年 10 月京津冀地区一次 PM<sub>2.5</sub> 污染过程的数值模拟[J]. 气象,42(7):827-837.

黄印博,黄红莲,韩永,等,2007. 合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析[J]. 大气与环境光学学报,2(6):423-433.

廖礼,漏嗣佳,符瑜,等,2015. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响[J]. 大气科学,39(1):68-82.

姜淑娟,毛节泰,王美华,2005. 北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究[J]. 环境科学学报,25(1):17-22.

王庚辰,孔琴心,刘广仁,等,1998. 秋末冬初北京大气中颗粒物的变化[C]//第七届全国大气环境学术会议论文集/大气环境科学技术进展. 北京:中国环境科学学会大气环境分会:210-215.

姚青,刘敬乐,韩素芹,等,2016. 天津城区春节期间大气气溶胶污染特征和数浓度分布[J]. 气象,42(4):443-449.

张美根,徐永福,张仁健,等,2005. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布[J]. 地球物理学报,48(1):46-51.

张仁健,王明星,胡非,等,2002. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究[J]. 中国科学院研究生院学报,19(1):75-81.

张小曳,孙俊英,王亚强,等,2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报,58(13):1178-1187.

张悦,樊曙先,李皓,等,2016. 气溶胶辐射效应在华东地区一次雾-霾过程中的作用[J]. 气象学报,74(3):465-478.

Andreae M O, Gelencsér A, 2006. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols[J]. Atmos Chem Phys,6(10):3131-3148.

Favez O, Cachier H, Sciare J, et al, 2009. Evidence for a significant contribution of wood burning aerosols to PM<sub>2.5</sub> during the winter season in Paris, France [J]. Atmos Environ, 43 (22/23): 3640-3644.

Flowers B A, Dubey M K, Mazzoleni C, et al, 2010. Optical-chemical relationships for carbonaceous aerosols observed at Jeju Island, Korea with a 3-laser photoacoustic spectrometer [J]. Atmos Chem Phys Discuss,10(4):9369-9389.

Hoffer A, Gelencsér A, Guyon P, et al, 2006. Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols [J]. Atmos Chem Phys,6(11):3563-3570.

Jacobson M Z, 2004. Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity[J]. J Geophys Res: Atmos,109(D21):D21201.

Lewis K, Arnott W P, Moosmüller H, et al, 2008. Strong spectral variation of biomass smoke light absorption and single scattering albedo observed with a novel dual-wavelength photoacoustic instrument[J]. J Geophys Res: Atmos, 113(D16):D16203.

Puxbaum H, Caseiro A, Sánchez-Ochoa A, et al, 2007. Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background[J]. J Geophys Res: Atmos, 112(D23):D23S05.