

北京秋季大气气溶胶光学厚度与 Angström 指数观测研究

张勇^{1,2}, 银燕^{2*}, 刘蕴芳¹, 赵凤生³, 任静⁴ (1.环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 2.南京信息工程大学, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 3.北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 4.渭南市环境保护局, 陕西 渭南 714000)

摘要: 利用 2010 年 10~11 月 CE318 太阳光度计观测资料, 得出了北京市秋季气溶胶光学厚度(AOD_{λ=500nm}), Angström 波长指数(α)和浊度系数(β)。结果显示, 气溶胶 AOD, Angström 指数, 浊度系数平均值分别为 0.5(±0.69)、0.95(±0.33)、0.24(±0.31), 变异系数分别为 139%、35%和 132%。非污染天, AOD 变化较小, 峰值出现在 15:00, 但大气中细粒子组分相对较高; 污染天, AOD 波动很大, 没有明显的日变化, 颗粒物以细粒子为主。非污染天, 当 $\alpha < 0.5$, α 与 AOD 呈反相关, $\alpha > 1.0$, 两者呈现正相关; 污染天, 两者无明显关系, 但当 AOD > 1.0, α 随 AOD 的增大而变小。当 $V_{\max} < 1\text{m/s}$ 和 $1\text{m/s} < V_{\max} < 4\text{m/s}$, α 随 AOD 呈现相似的变化, 风速不会成为局地气溶胶变化的影响因素; 当 $V_{\max} > 4\text{m/s}$, AOD 和 α 均出现小值, α 与 AOD 呈负相关。风向也是影响 α 和 AOD 变化的重要因素, 尤其 ENE 为主导风向时, α 与 AOD 呈明显正相关。温度的变化并未对 α 和 AOD 的变化造成很大影响。局地扬尘或沙尘气溶胶呈非亲水性, 但当 $\alpha > 0.5$, AOD 随相对湿度(RH)的增大有一定程度的增大。

关键词: 北京; 气溶胶光学厚度; Angström 波长指数; 气象要素

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2014)06-1380-10

A observational study of aerosol optical depth and angstrom wavelength exponent over Beijing in Autumn. ZHANG Yong^{1,2}, YIN Yan^{2*}, LIU Yun-fang¹, ZHAO Feng-sheng³, REN Jing⁴ (1.South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3.College of Global Change and Earth System, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4.Weinan Municipal Environmental Protection Bureau, Weinan 714000, China). *China Environmental Science*, 2014,34(6): 1380~1389

Abstract: The aerosol optical depth (AOD_{λ=500nm}), Angström wavelength exponent (α) and turbidity coefficient (β) are derived from sun photometer CE318 measurements over Beijing from October to December 2010. The results show that, the mean values of AOD, Angström wavelength exponent and turbidity coefficient are 0.5±0.69, 0.95±0.33, 0.24±0.31 with coefficients of variation (CV) of 139%, 35% and 132%, respectively. AOD change little in polluted days with a peak at 15:00, but the concentrations of fine particles are relatively high. During polluted days, AOD fluctuate widely without a distinct diurnal variation, and the fine particles are the main components of the air pollutants. In addition, during the non-polluted days, positive and negative correlations are found between α and AOD when α smaller than 0.5 and greater than 1.0, respectively. There is no clear correlation between α and AOD during the polluted days, while a decrease trend of α is detected with increase of AOD when α are larger than 1.0. It is indicated that wind speed would not play a critical role in the local changes of aerosol concentrations from similar variations between α and AOD when $V_{\max} < 1\text{m/s}$ or $1\text{m/s} < V_{\max} < 4\text{m/s}$; While both values of α and AOD are very small and shows negative correlation when $V_{\max} > 4\text{m/s}$. Wind direction can also have large influence on the relationship between α and AOD, which shows a positive correlation especially for ENE direction. The temperature shift has little effect on variation of α and AOD. AOD increase with relative humidity when α is greater than 0.5 though dust aerosols are hydrophobic in this study.

Key words: Beijing; aerosol optical depth; Angström wavelength exponent; meteorological factors

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY200706036);国家自然科学基金项目(41030962);国家环境保护公益性行业科研专项(201309042)

* 责任作者, 教授, yinyan@nuist.edu.cn

大气气溶胶是由大气介质和混合于其中的固体或液体颗粒物组成的多相体系,气溶胶颗粒可直接或间接改变地-气系统的辐射收支,影响全球或区域气候和环境.研究气溶胶粒子对环境气候的影响在很大程度上取决于对其时空分布的了解和光学特性的准确估算.气溶胶光学厚度(AOD)和 Angström 波长指数是表征大气光学特性的最基本的参量,可以用来推算大气气溶胶的含量,确定气溶胶尺度和谱分布,检验校对卫星反演资料,是确定气溶胶气候效应的关键因子,并在一定程度上能够反映区域大气的污染程度和污染类型^[1-2].

近几十年来,国内外学者利用遥感方法对我国大气气溶胶的光学特性研究做了大量的工作.罗云峰等^[3-5]利用全国 40 多个站点的长期太阳直接辐射资料反演了中国气溶胶光学厚度的变化特征,得出中国气溶胶光学厚度在 1960~1980 年代有这明显的增长.李霞等^[6]利用乌鲁木齐 2002~2003 年 CE318 气溶胶观测资料,反演得出气溶胶光学厚度、大气浑浊度系数 β 和 Angström 波长指数 α ,全年气溶胶光学厚度在 7 月最小,3 月最大,这与 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 浓度的月分布不尽相同,春季风沙天气导致波长指数的减小.Zhang 等^[7]利用多波段太阳光度计对我国的 4 个不同地区的气溶胶消光特性进行了分析.中国科学院大气物理研究所 CERN 太阳分光观测网(CSHNET)初步覆盖了我国各类陆地生态系统,观测结果能较好的描述我国部分地区大气气溶胶光学特性的时空分布^[8-9].2000 年以后,在东亚地区针对我国气溶胶光学特性和辐射特征进行了一系列的观测研究,如 ACE-Asia^[10-12],APEX^[13]和 SKYNET^[14],以及 EAST-AIRE 计划^[15]取得了大量的成果.

针对北京地区气溶胶光学特征,我国学者也做了大量的研究.王中挺等^[16]利用京津唐地区环境一号卫星(HJ-1)的 CCD 数据,通过暗目标法反演陆地气溶胶,并对气溶胶光学厚度进行垂直订正和湿度校正,得到 PM_{10} 的反演模型,并与中国环境监测总站的地面监测数据进行了对比检验,证明 HJ-1 的时空分辨率满足 PM_{10} 周监测的需要.

何秀等^[17]利用 MODIS 两年的气溶胶光学厚度产品与北京地区 API 转化得到的 PM_{10} 质量浓度、北京大学站点直接监测的 PM_{10} 质量浓度以及香港元朗站点监测的 PM_{10} 质量浓度做相关性分析,证实气溶胶遥感光学厚度经过垂直和湿度影响订正后,可以应用于地面 PM_{10} 监测.李成才等^[18]对 2001 年在北京地区利用太阳光度计观测的气溶胶光学厚度和 MODIS 气溶胶产品进行了比较,证实 MODIS 气溶胶产品可用于污染分析;并通过气溶胶光学厚度个例分析,得出除局地排放外,周边区域(主要为西南和南向)的输送对北京市区的空气污染贡献份额较大.章文星等^[19]2002 年通过观测试验认为,与 20 世纪 90 年代中期相比,北京近 3 年秋冬季气溶胶光学厚度有所减小,而春季气溶胶光学厚度因为沙尘天气的影响,在近 2 年有明显增加,Angström 指数变小,表明大粒子比例增加,因此需要加强对沙尘源的治理.Xia 等^[20]整合北京地区太阳光度计数据发现北京地区 1997~2005 年间气溶胶光学厚度有显著上升趋势.

由于北京特殊的地理条件以及城市规模较大、人口众多、生产活动频繁、能源消耗密集,污染物排放量大和排放强度相对集中,当遇到不利气象条件并维持较长时间时,污染物会不断积累,空气质量变差,甚至达到重度污染,影响大气能见度,对人们的生活造成了巨大影响.但由于对北京气溶胶的研究多是通过短时间的观测,了解气溶胶的物理化学特性,该方法时效性短,不能提供长时间序列气溶胶特征,并且耗资大,给政府部门的决定决策带来困扰.本文利用与气溶胶自动监测网络(AERONET)同型号的 CE318 太阳光度计观测资料讨论北京秋季气溶胶光学厚度和 Angström 波长指数的关系,旨在分析北京大气光学特征和污染特征,研究北京大气污染物来源及组成,为政府部门治理大气污染提供帮助.

1 实验

利用法国 CIMEL 公司制造的 CE318 自动太阳-天空光谱辐射计,得到 2010 年 10 月至 12 月 8 个可用通道(340,380,440,500,670,870,1020,1245nm)的观测数据.仪器选用 Langley 方法定标,

实验地点设在北京理工大学(BIT),由光度计自动采集并计数,每日采样10h(北京时间8:00~18:00).根据 Smirnov 等^[21]提出的方法,对实验数据进行了严格的质量控制,消除了有云数据的影响.图1为 BIT 观测点与 AERONET 北京站 440nm 气溶胶光学厚度的数据对比,可以看出二者相关系数为 0.996,系统偏差为 0.02.

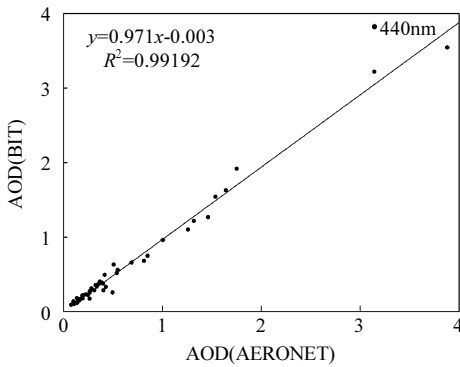


图1 BIT 观测点与 AERONET 光学厚度数据对比
Fig.1 The comparison of the datas of AODs between BIT station and AERONET station

$$\alpha = -\frac{\ln[\tau(\lambda_1)/\tau(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (1)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度; λ_1 、 λ_2 为波长. α 范围一般为0~2,平均值大约为1.3;较小的 α 代表较大粒径的气溶胶粒子为主控粒子,相反,较大的 α 代表较小粒径的气溶胶粒子为主控粒子.如当 α 接近于0时,说明气溶胶主控粒子是大粒径的沙尘粒子,当 α 接近于2时,气溶胶主控粒子是小粒径的烟雾粒子^[14,22-23];城市-工业气溶胶一般为 $1.1 \leq \alpha \leq 2.4$,生物质燃烧气溶胶为 $1.2 \leq \alpha \leq 2.3$ ^[22],沙尘气溶胶一般为 $-1 \leq \alpha \leq 0.5$ ^[23],海盐气溶胶为 $1.1 \leq \alpha \leq 1.8$ ^[24].本实验选取 440,500,670nm 三个通道数据,计算北京秋季 AOD(550nm)和 Angström 波长指数(α).

浑浊度系数(β)计算方法如式(2)所示

$$\beta = \tau(0.5\mu\text{m}) / 0.5^{-\alpha} \quad (2)$$

β 的范围一般为0~0.5,当 $\beta \leq 0.1$ 时,代表清洁天气;当 $\beta \geq 0.2$ 时,代表相当浑浊的天气^[25].

2 结果与讨论

Angström 波长指数的计算方法如式(1)所示

2.1 气溶胶光学特性的逐时变化和日变化

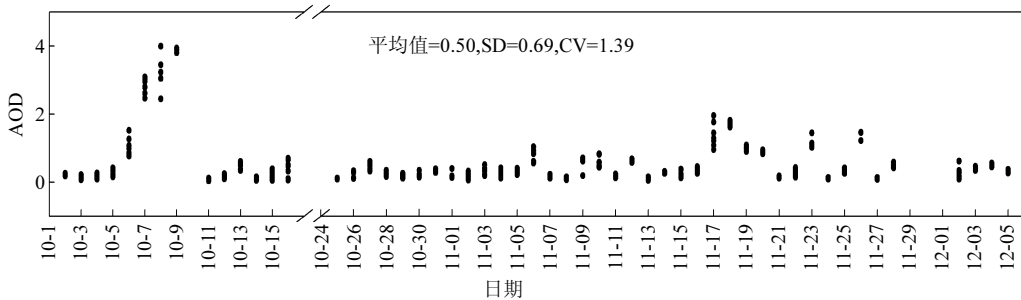


图2 气溶胶 AOD 的逐时变化

Fig.2 Hourly mean of the optical depth of aerosol

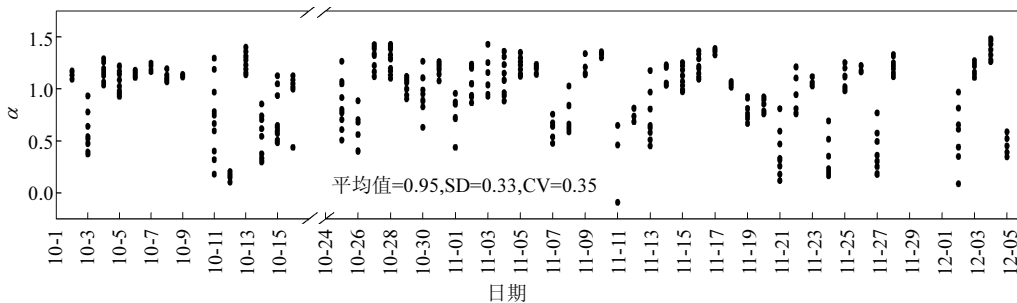


图3 气溶胶 Angström 指数的逐时变化

Fig.3 Hourly mean of the Angström parameter of aerosol

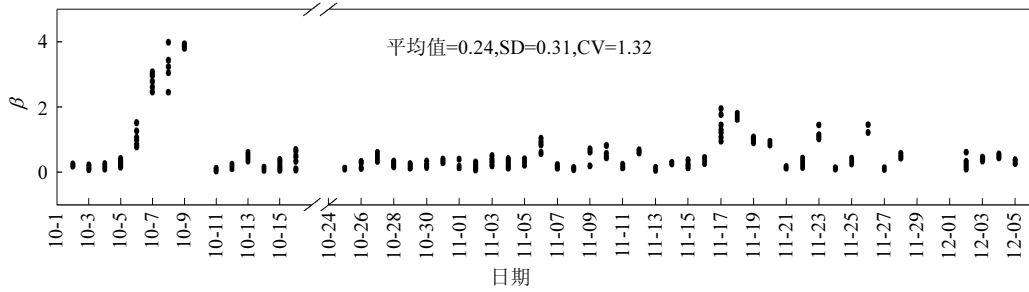


图 4 气溶胶浑浊度系数的逐时变化

Fig.4 Hourly mean of the turbidity coefficient of aerosol

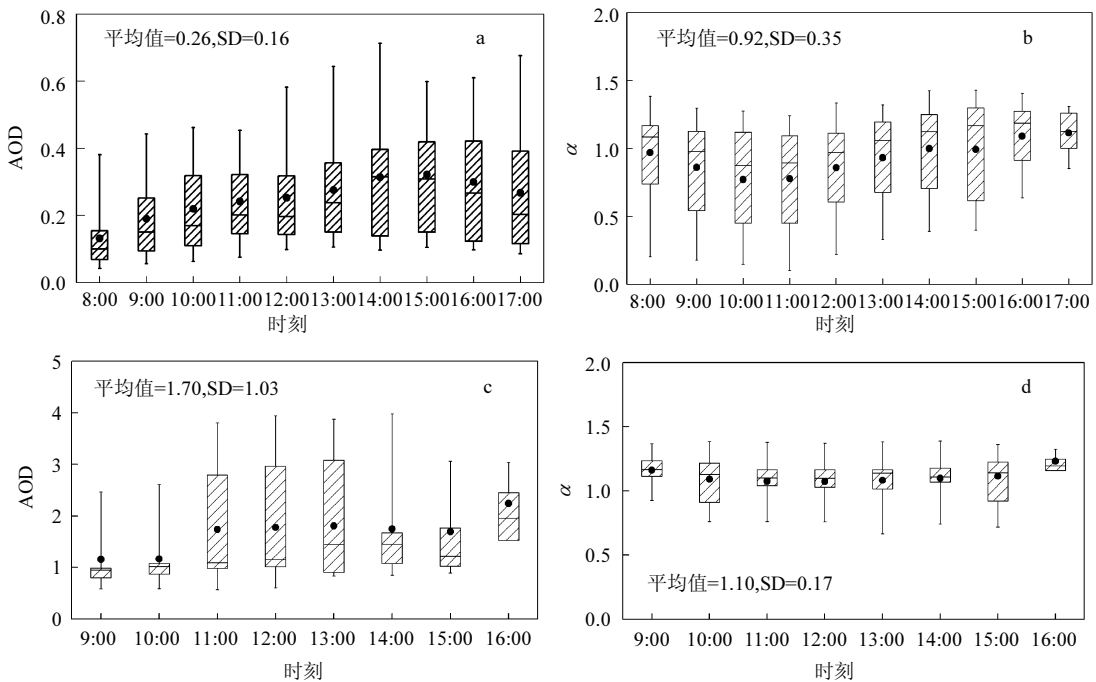


图 5 非污染天(a,b)与污染天(c,d)光学厚度与 Angström 指数的日变化

Fig.5 Daily variation of AOD and Angström parameter at polluted days and non-polluted days differently

图 2、图 3 和图 4 为观测期间北京气溶胶光学特征的逐日变化图.可以看出,AOD 和 β 除去个别天数受天气系统和局地气象条件影响,出现高值外,大部分变化比较平稳,处于低值.观测期间 AOD 平均值为 $0.50(\pm 0.69)$,变异系数为 139%, β 平均值为 $0.24(\pm 0.31)$,变异系数为 132%.AOD 和 β 平均值均与王跃思等^[8]2004 年 8~12 月的观测结果基本一致,AOD 小于 Li 等^[26]2007 年全年在香河的观测结果(0.82),AOD 有很明显的季节变化和年际变化特征.由于 AOD 和 β 的极大值与平均值差值过大,造成其标准偏差和变异系数相对

较大. α 的日波动较大,观测期平均值为 0.95 (± 0.33),小于王跃思等^[8]的观测结果(1.66),变异系数为 35%.从表 1 统计结果可以看出,观测期间 40%的天数 $AOD < 0.2$,大气比较清洁,而 $AOD > 0.5$,污染比较严重的天数也达到了 26.6%. 10 月 6~9 日受天气系统影响,风速小、逆温强、湿度大,华北地区出现了大范围不利于污染物扩散的气象条件,北京出现了空气质量 3d 轻度污染、1d 中度污染.11 月 17~21 日,受持续稳定气象条件和雾天的影响,污染物扩散条件较为不利,导致污染物形成积累,空气质量连续超标,并有 2d 达到中度污

染以上级别,加上本月 3 次外来沙尘天气,对空气质量也造成了不利影响。

根据观测期间北京市环保局空气质量日报,并对观测数据筛选,有 11d 为三级及三级以上污染天气,本文特将其分离出来,与非污染天加以对比。图 5 为观测期间非污染天(a 和 b)与污染天(c 和 d)AOD 和 α 日变化情况。非污染天 AOD 平均值为 $0.26(\pm 0.16)$,大气相对清洁,大气状况比较稳定, α 平均值为 $0.92(\pm 0.35)$,大气中细粒子较多,但粗离子也占有相当比率。非污染天 AOD 在 14:00~15:00 达到最大值,这可能是因为晴天下午 14:00~15:00 正是对流最旺盛的时候,地面的污染物被输送到高空,造成气溶胶柱浓度升高^[27]。夜间因为气溶胶的老化作用,处于边界层上部的粒子长大,中午 11:00,由于对流作用将前一日输送至边界层上部的粒子带到地面,造成 α 在此刻达到最低值,此后 α 缓慢上升,至下午 17:00 达到最大值。污染天 AOD 平均值为 $1.70(\pm 1.03)$,污染相当严重,AOD 波动也较大,没有明显的日变化, α 平均值为 1.10 ± 0.17 ,波动较小,维持在 1.10 上下,这说明污染天颗粒物模态相对比较简单,以细粒子污染为主。基于 AERONET 北京站 5 年观测数据,Xia 等^[28]分析得到的北京地区气溶胶光学厚度日变化表明下午为高值,而且也探讨 MODIS 过境时空 AOD 与日平均值之间的差异。

表 1 观测期间 AOD 和 Angström 指数各级发生频率(%)

Table 1 The frequency of different AODs and Angström parameters during the observation (%)

项目	AOD			α		
	<0.2	0.2~0.5	>0.5	<0.5	0.5~1.0	>1.0
频率	40.0	36.4	26.6	13.2	29.8	57.0

2.2 气溶胶光学厚度与 Angström 指数的关系

Tanaka 等^[29]认为城市-沙尘混合性气溶胶可以出现 4 种 α -AOD 关系,即在 α 较大时, α 和 AOD 有正相关和反相关 2 种情况,在 α 较小时, α 随着 AOD 的增大减小或者保持不变。Reid 等^[30]在巴西热带雨林的观测表明,AOD 较小时, $\alpha(498\sim 871\text{nm})$ 与之成反比,当大气中的烟雾粒子大量增加造成 AOD 增大时, α 也随之增大。Xia 等^[31]和 Li 等^[26]研究了北京和香河 α -AOD 关系,

认为两者呈弱的负相关。将部分国内外不同气溶胶类型 AOD 与 Angström 指数关系的研究情况列于表 2,以与北京市区气溶胶 Angström 指数和光学厚度的关系做比较。图 6 为 2007~2010 年北京秋季大气气溶胶 α -AOD 关系散点图,其中 2010 年为 BIT 观测点结果,其余年份为同期 AERONET 北京站观测数据。可以看出,由于具体天气系统,气象条件及气溶胶类型的影响,不同年份 AOD 和 α 的关系不尽相同。

图 7 为非污染天和污染天 α -AOD 关系。可以看出,非污染天 $\text{AOD}<0.7$, α 值从 0~1.5,变化比较大,大气受沙尘、地面扬尘等粗粒子和城市-工业气溶胶共同影响。当 $\alpha<0.6$, α 与 AOD 成反比,即影响大气浑浊度主要为粗离子,当 $\alpha>0.8$,随着 AOD 的增大 α 也随之变大,城市-工业气溶胶等细粒子则为主要影响因素,这与 Nakajima 等^[13]的研究结果相似。污染天,AOD 大于 0.6, α 的变化范围为 0.6~1.5,呈现城市工业与生物质燃烧混合污染的状况。当 $\text{AOD}>1.2$, α 值均大于 1.0,并随着 AOD 的增大, α 有些许减小。污染天较高的气溶胶浓度会造成气溶胶的碰并过程增多,二次硫酸盐气溶胶的吸湿过程以及黑炭气溶胶的老化过程,均会使气溶胶长大,导致 α 减小^[26,30,33]。

为进一步明确不同气溶胶类型 α 与 AOD 的关系,对非污染天和污染天数据做了详细筛选,选取具有典型 α -AOD 关系的时间段予以讨论。如图 8 所示,其中 10 月 25 日、10 月 28~30 日和 11 月 21 日属于非污染天,AOD 均都在 0.5 以下, α 的变化范围则为 0.1~1.5,颗粒物粒径变化较大;10 月 7~9 日属于污染天。可以看到,10 月 25 日 AOD 在 0.1 左右,大气非常清洁, α 值在 0.4~1.3 之间, α 随着 AOD 的增大而减小。由于当日相对湿度仅为 20%左右,因此排除掉相对湿度的影响。根据气团轨迹显示,当日气流主要来源于蒙古东部,气流清洁,但气流的长距离输送过程中,气溶胶粒子的老化过程使大气浑浊度增加。10 月 28~30 日,AOD 变化范围为 0.15~0.4 左右, α 值在 0.7~1.5 之间,大气以细粒子为主,大气以城市性气溶胶为主^[29], α 随 AOD 的增大而增大,Kaufman 等^[34]研究认为,在比较清洁大气条件下,新粒子的生成导

致大气中积聚模态颗粒增加.11 月 21 日, α 值在 0.1~1.0 之间, α 随 AOD 的增大而减小,大气受为城市型气溶胶和沙尘气溶胶共同影响,与 Tanaka 等^[29]的研究结论一致.10 月 7~9 日,AOD 均在 2.0 以上,最大值接近于 4.0,大气污染严重, α 变化范围为 1.0~1.4,粒子主要以细粒子为主.可以看到,随着 AOD 的增大, α 减小,即随着大气浑浊度增加起主要作用的颗粒物向大粒径方向移动,但仍为细粒子.此次污染过程,气流以西南气流为主,

长距离输送过程将石家庄、保定等工业城市的污染物送向北京,根据 MODIS 火点,华北平原存在大范围的秸秆燃烧过程,同时北京城市主要气象条件为小风高湿.综合以上几点因素,认为此次污染过程,硫酸盐气溶胶的吸湿过程以及黑炭气溶胶的老化过程,以及污染天较高的气溶胶浓度造成的碰并过程增多,均会使气溶胶长大,导致 α 减小^[26,30,33],关于气团轨迹对北京地区气溶胶光学特性的影响,Xia 等^[35]做了大量细致的工作.

表 2 Angström 指数与 AOD 关系

Table 2 The relationship between Angström parameters and AODs

地点	时间	气溶胶类型	结论
日本长崎 ^[29]	1982-04-24~05-21	黄沙-城市工业混合性气溶胶	城市-沙尘混合性气溶胶可出现的 4 种 α -AOD 关系
巴西等 ^[30]	1995 年 8 月~9 月	生物质燃烧类	AOD 较小时, α 与之成反比;烟雾 粒子致 AOD 增大时, α 也随之增大
北京等 ^[31]	2001 年春	城市工业、沙尘等	弱的负相关
香河 ^[26]	2004 年 9 月~2005 年 9 月	城市工业、沙尘等	弱的负相关
北京等 ^[9]	2004 年 8 月~2005 年 9 月	多种类型	α 变化大,污染源庞杂,但大于兰州观测结果,AOD 波动较大
银川等 ^[14]	1998~2000 年	城市、沙尘、生物质燃烧	(银川) α 较小,与 AOD 成负相关; α 较大时,两者正相关
中国 19 个地区 ^[8]	2004 年 8~12 月	多种类型	不同气溶胶来源, α -AOD 关系差别较大
西北地区 ^[32]	2002~2003	沙尘气溶胶	分析了不同地域,不同气象条件对 α 和 AOD 关系的影响

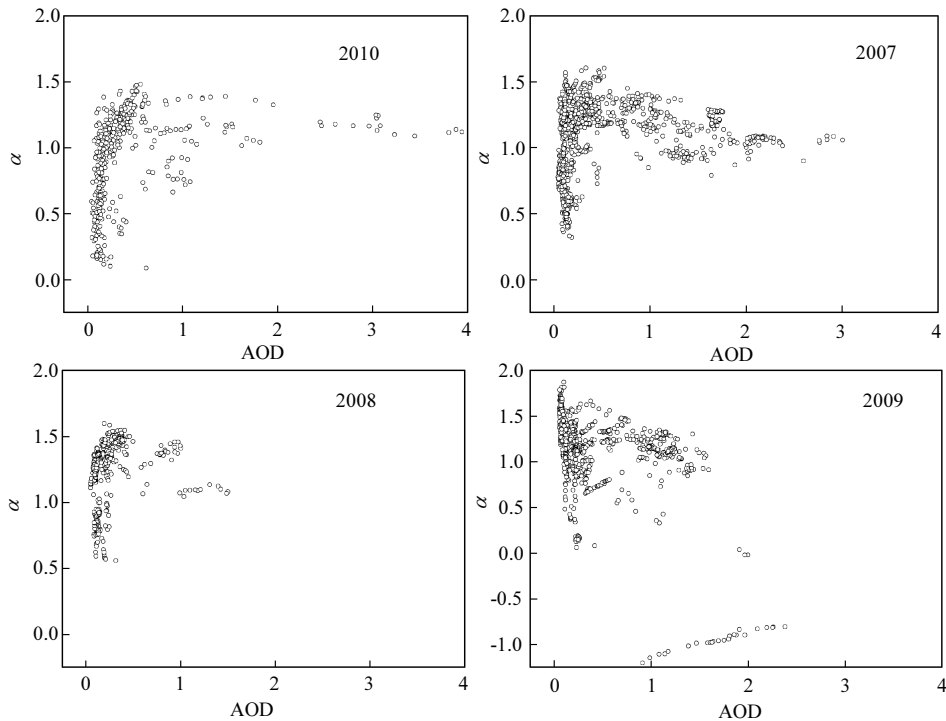


图 6 2007~2010 年北京市气溶胶 Angström 指数与光学厚度的关系

Fig.6 Relationship between Angström parameters and AODs from 2007to 2010in Beijing city

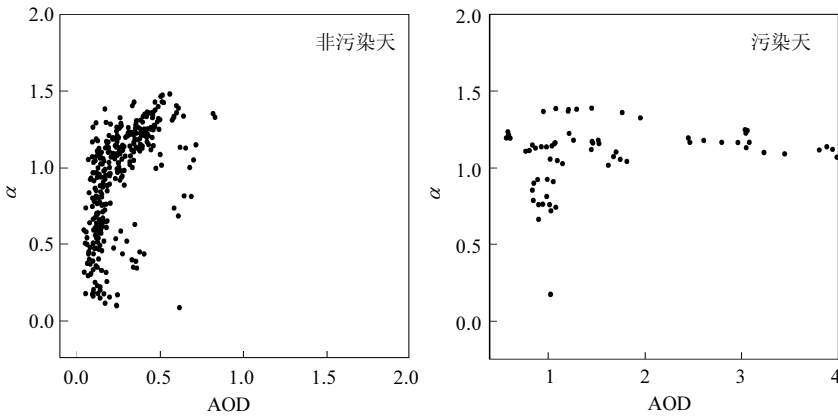


图 7 非污染天与污染天 Angström 指数与光学厚度的关系

Fig.7 Relationship between Angström parameters and AODs at polluted days and non-polluted days differently

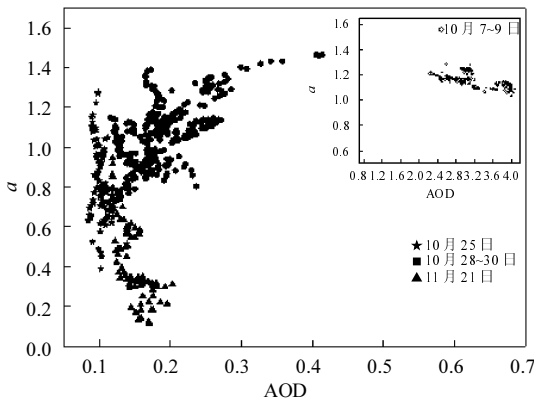


图 8 不同气溶胶类型 Angström 指数与光学厚度的关系

Fig.8 Relationship between Angström parameters and AODs of different aerosol type

2.3 气象要素对气溶胶 α -AOD 关系的影响

气象要素的变化也会影响 α 和 AOD 的关系。图 9 为不同风速控制下 α -AOD 关系图, V_{max} 为风速极大值的每小时平均。当 $V_{max} < 1\text{m/s}$ 和 $1\text{m/s} < V_{max} < 4\text{m/s}$, α 随 AOD 呈现相似的变化, 表明观测点周围不存在强的源或汇, 风速不是影响局地气溶胶变化的主要因素。当 $V_{max} > 4\text{m/s}$, 由于大风对小颗粒的清除作用, AOD 降到 0.4 以下, α 也降到 0.6 以下, α 与 AOD 呈负相关。对风向频率进行了统计, 发现 ENE, SW 和 NW 为观测期间的盛行风向。图 10 为不同风向下 α 随 AOD 的变化图。当风向为 ENE, α 随 AOD 的增大而增大, 两者呈现明显的正相关, 并且 α 和 AOD 的变化范围都

很大, 表明污染天和非污染天大气状况都受到 ENE 风向的影响, 尤其是 AOD 大于 1.0 的重度污染情况均是 ENE 为主控风向, 这是因为 BIT 观测点的位于北京市西三环和北三环的交界处, 地处城市西北向, 当风向为 ENE 时, 城东的大量污染物被吹向观测点, 并且 Chen 等^[36]的研究认为, 山谷烟囱效应造成污染物的回流, 大量污染物悬浮于北京市上空, 两者的共同影响造成观测点 AOD 高值的出现。当风向为 SW 时, 可以看到散点分为两部分, 当 $\alpha < 0.6$ 时 α 随 AOD 的增大而减小, 当 $\alpha > 1.0$ 时, α 随 AOD 变化不大。当风向为 NW 时, 可以看到 α 几乎全部大于 0.5, 大气中含有相当比例的细粒子, 并且当 $\alpha > 1.0$, α 随 AOD 的增大而增大。

为了验证温度(T)变化对颗粒物模态的影响, 将 AOD 分为 3 个等级, 验证不同污染状况下 α 与 T 的关系(图 11)。可以看到, AOD < 0.2 时, α 和 T 没有明显的关系。当 $0.2 < \text{AOD} < 0.5$, 温度较低时部分的点 $\alpha > 1.0$, 认为是北京及周边地区供暖后化石燃料燃烧增多导致细粒子排放增, 温度较高时, 尤其当 AOD > 0.5 时, 有大量的点 $\alpha > 1.0$, 认为在温度较高的污染环境下由于光化学反应的作用, 二次有机气溶胶粒子的生成速率加快, 大气中细粒子含量增加。因为影响 AOD 变化的因素较多, 关于温度和 AOD 的关系分析, 需要考虑二者协同变化, 即同时受天气状况和污染源影响, 因此温度变化并不是导致 AOD 变化的内在原因。图 12 为不

同 α 级别下 AOD 随 RH 的变化.可以看到, $\alpha < 0.5$, 即大气中以地面扬尘和沙尘气溶胶为主时,AOD 随 RH 的增大而减小,气溶胶粒子为非亲水性.当 $0.5 < \alpha < 1.0$,部分 AOD 随着 RH 的增大而增大,气溶胶表现出一定的吸湿性. $\alpha > 1.0$ 时,AOD 随 RH

的增大幅度明显变大,认为是吸湿性粒子吸湿增长造成其散射增强的结果.还可以看到,在 RH 大于 50%的情况下,有部分的点 AOD 并没有明显的增加,气溶胶受相对湿度的影响并不大,这可能与气溶胶的化学组成有关.

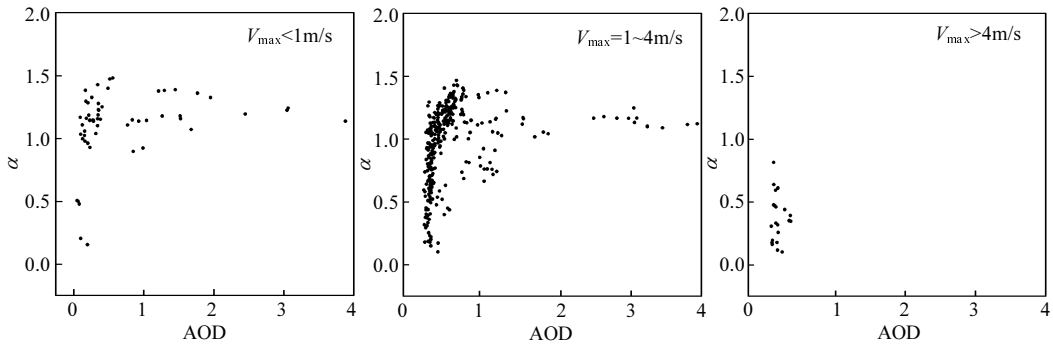


图 9 不同风速下 Angström 指数与光学厚度的关系

Fig.9 Relationship between Angström parameters and AODs at different wind speed

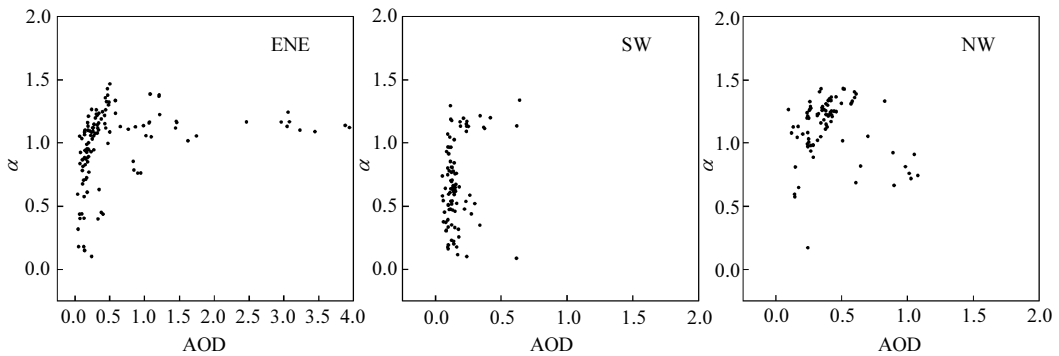


图 10 不同风向下 Angström 指数与光学厚度的关系

Fig.10 Relationship between Angström parameters and AODs in different wind direction

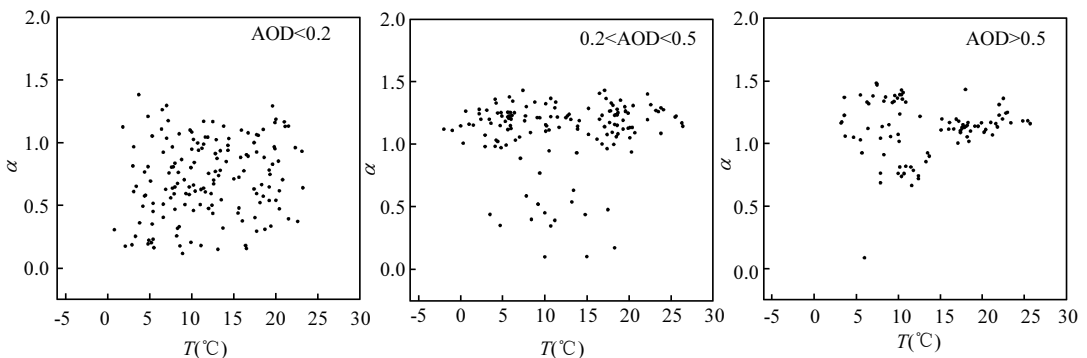


图 11 不同光学厚度下 Angström 指数与温度的关系

Fig.11 Relationship between Angström parameters and temperature with different AOD

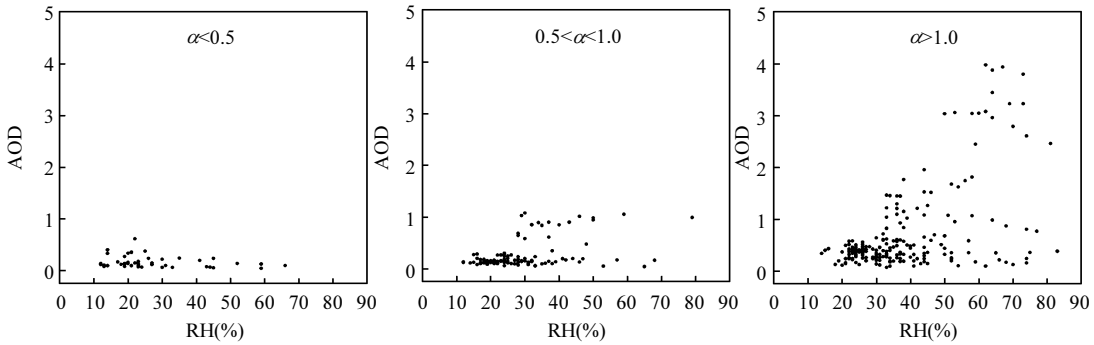


图 12 不同 Angström 指数下光学厚度与相对湿度的关系

Fig.12 Relationship between AODs and relative humidity with different Angström parameter

3 结论

3.1 北京 2010 年秋季气溶胶 AOD, Angström 指数, 浑浊度系数的平均值分别为 $0.5(\pm 0.69)$ 、 $0.95(\pm 0.33)$ 、 $0.24(\pm 0.31)$, 变异系数分别为 139%、35% 和 132%。受具体天气系统和污染状况的影响, 北京 2007~2010 年 α 与 AOD 表现出不同的关系。

3.2 非污染天气下, AOD 变化较小, 峰值出现在 14:00~15:00, 大气中细粒子组分相对较高。污染天, AOD 变化很大, 无明显日变化, 颗粒物以细粒子为主。

3.3 非污染天气下, 当 $\alpha < 0.5$, α 与 AOD 呈反相关, $\alpha > 1.0$, 两者正相关, 呈现城市工业-沙尘气溶胶混合影响的状况。污染天, 两者无明显关系, 但当 AOD > 1.0, 由于颗粒物之间的碰并, 凝聚过程, 加之相对湿度的影响, 颗粒物的长大会导致 α 的减小, 呈现城市工业与生物质燃烧混合污染的状况。

3.4 当 $V_{\max} < 1\text{m/s}$ 或 $1\text{m/s} < V_{\max} < 4\text{m/s}$, α 随 AOD 呈现相似的变化, 观测点周围不存在强的源或汇, 风速不会成为局地气溶胶变化影响因素; 当 $V_{\max} > 4\text{m/s}$, α 与 AOD 呈负相关。当风向为 ENE, α 与 AOD 正相关; 为 SW, $\alpha < 0.6$, 两者负相关, $\alpha > 1.0$, α 不随 AOD 发生变化; 为 NW, α 几乎全部大于 0.5, 大气中含有相当比例的细粒子, 并且当 $\alpha > 1.0$, α 随 AOD 的增大而增大。

3.5 当 AOD < 0.2 时, 气溶胶尺寸与温度无必然关系; AOD > 0.2 时, 温度较低或较高时, 出现大量的细粒子。 $\alpha < 0.5$, AOD 随 RH 的增大减小; $\alpha > 0.5$, AOD 随 RH 的增大而增大, 气溶胶表现出一定的

吸湿性。

参考文献:

- [1] Kaufman Y J, Fraser R S, Ferrare R A. Satellite measurements of large-scale air pollution: Methods [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(D7): 9895-9909.
- [2] 杜吴鹏, 王跃思, 辛金元, 等. RegCM3 模式模拟我国春季气溶胶光学厚度及检验 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 1-9.
- [3] 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. *科学通报*, 2000, (05): 549-554.
- [4] 吕达仁, 周秀骥, 李维亮, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析 [J]. *大气科学*, 2002, 26(006): 721-730.
- [5] 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析 [J]. *气象学报*, 2001, 59(1): 77-87.
- [6] 李霞, 陈勇航, 胡秀清, 等. 乌鲁木齐大气气溶胶的光学特性分析 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(B06): 22-25.
- [7] Zhang J, Mao J, Wang M. Analysis of the aerosol extinction characteristics in different areas of China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19: 136-152.
- [8] 王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测 (2004-08~2004-12) [J]. *环境科学*, 2006, 27(9): 1703-1711.
- [9] Xin J, Wang Y, Li Z, et al. Aerosol optical depth (AOD) and Angström exponent of aerosols observed by the Chinese sun hazemeter network from August 2004 to September 2005 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D05203.
- [10] Alfaro S C, Gomes L, Rajot J L, et al. Chemical and optical characterization of aerosols measured in spring 2002 at the ACE-Asia supersite, Zhenbeitai, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D23): 8641.
- [11] Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D23): 8633.

- [12] Seinfeld J H, Carmichael G R, Arimoto R et al, ACE-ASIA-Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004,85(3):367-380.
- [13] Nakajima T, Sekiguchi M, Takemura T, et al. Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003,108(D23): 8658-8674.
- [14] Kim D H, Sohn B J, Nakajima T, et al. Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004,109: D02209.
- [15] Li Z, Chen H, Cribb M, et al. Preface to special section on East Asian studies of tropospheric aerosols: An international regional experiment (EAST-AIRE) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007,112(D22):D22S00.
- [16] 王中挺,王子峰,厉 青,等.环境一号卫星在监测大气 PM10 中的应用 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(2):202-206.
- [17] 何 秀,邓兆泽,李成才,等.MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM10 监测方面的应用研究 [J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2010,(2):178-184.
- [18] 李成才,毛节奏,刘启汉.利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. *大气科学*, 2003,27(5):869-880.
- [19] 章文星,吕达仁,王普才.北京地区大气气溶胶光学厚度的观测和分析 [J]. *中国环境科学*, 2002,22(6):495-500.
- [20] Xia X, Chen H, Goloub P, et al. A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 2007,112(D12):D12203.
- [21] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000,73(3):337-349.
- [22] Dubovik O, Holben B N, Eck T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002,59(3): 590-608.
- [23] Tanré D, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001,106(D16):18205-18217.
- [24] Remer L A, Kaufman Y J, Holben B N. Interannual variation of ambient aerosol characteristics on the east coast of the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999,104(D2): 2223-2231.
- [25] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. *Tellus*, 1964,16(1):64-75.
- [26] Li Z, Xia X, Cribb M, et al. Aerosol optical properties and their radiative effects in northern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007,112:D22S01.
- [27] 李 韧,季国良.敦煌地区大气气溶胶光学厚度的季节变化 [J]. *高原气象*, 2003,22(1):84-87.
- [28] Xia X, Chen H, Wang P, et al. Variation of column - integrated aerosol properties in a Chinese urban region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 2006,111: D05204.
- [29] Tanaka M, Shiobara M, Nakajima T, et al. Aerosol optical characteristics in the yellow sand events observed in May, 1982 in Nagasaki: Part I Observations [R]. 1989.
- [30] Reid J S, Eck T F, Christopher S A, et al. Use of the Angstrom exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999,104(D22):27473-27489.
- [31] Xia X, Chen H, Wang P, et al. Aerosol properties and their spatial and temporal variations over North China in spring 2001 [J]. *Tellus B*, 2005,57(1):28-39.
- [32] 盖长松.中国西北地区气溶胶光学厚度和波长指数观测数据的分析研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院, 2005.
- [33] 徐 政,李卫军,于阳春,等.济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(4):546-552.
- [34] Kaufman Y J, Fraser R S. Light extinction by aerosols during summer air pollution [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983,22(10):1694-1706.
- [35] Xia X, Chen H, Zhang W. Analysis of the dependence of column-integrated aerosol properties on long-range transport of air masses in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(36):7739-7750.
- [36] Chen Y, Zhao C, Zhang Q, et al. Aircraft study of mountain chimney effect of Beijing, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009,114(D8):D08306.

致谢: 感谢北京理工大学光电学院张寅超教授,陈和老师对观测实验的大力支持,感谢中国科学院大气物理研究所陈洪滨研究员建立和维持北京 AERONET 站观测。

作者简介: 张 勇(1986-),男,陕西渭南人,硕士,主要从事大气气溶胶研究.发表论文 1 篇。