

# 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测

徐政<sup>1</sup>,李卫军<sup>1</sup>,于阳春<sup>1</sup>,王新锋<sup>1</sup>,周声圳<sup>1</sup>,王文兴<sup>1,2\*</sup> (1.山东大学环境研究院,山东 济南 250100; 2.中国环境科学研究院,北京 100012)

**摘要:**应用黑碳仪和积分浊度计于2009年10月11日至11月18日针对济南市大气气溶胶的光学特性进行了观测.结果显示,观测期间霾天气的散射系数和吸收系数及非霾天气的散射系数和吸收系数平均值分别为 $(582.5\pm 311)\text{Mm}^{-1}$ 、 $(680.2\pm 47.2)\text{Mm}^{-1}$ 和 $(205.7\pm 134.8)\text{Mm}^{-1}$ 、 $(31.0\pm 25.8)\text{Mm}^{-1}$ .霾天气的气溶胶散射系数和吸收系数分别为非霾天气的2.6倍和2.8倍,单散射反照率(SSA)也高于非霾天气.霾天气中二次气溶胶生成及黑碳气溶胶聚集是改变吸收系数、散射系数和SSA的日变化趋势的重要原因.此外,估算了观测期间及霾和非霾天气中气溶胶的光学厚度(AOD)分别为0.78,1.14和0.47.后向气流轨迹分析显示,非霾天气的气流主要来自于济南的西北至东北方向,运动速度快;而霾天气的所有的气流均来自于济南西南至东南方向,运动速度慢,当气流经过山东南部的火点时加剧了济南市的霾,并严重影响到该地区大气气溶胶的光学性质.

**关键词:**霾;吸收系数;散射系数;光学厚度;济南

**中图分类号:** X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2011)04-0546-07

**Characteristics of aerosol optical properties at haze and non-haze weather during autumn at Jinan city.** XU Zheng<sup>1</sup>, LI Wei-jun<sup>1</sup>, YU Yang-chun<sup>1</sup>, WANG Xin-feng<sup>1</sup>, ZHOU Sheng-zhen<sup>1</sup>, WANG Wen-xing<sup>1,2\*</sup> (1.Environment Research Institute of Shandong University, Jinan 250100, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2011,31(4): 546~552

**Abstract:** A field study was carried out using aethelometer and nephelometer from 11 October to 18 November, 2009 in Jinan. The results show that mean scattering coefficient (Scat.) and absorption coefficient ( $A.$ ) are  $(582.5\pm 311)\text{Mm}^{-1}$  and  $(680.2\pm 47.2)\text{Mm}^{-1}$  during hazy day,  $(205.7\pm 134.8)\text{Mm}^{-1}$  and  $(31.0\pm 25.8)\text{Mm}^{-1}$  during non-hazy days. In particular, Scat. and Abs. on hazy day were 2.6 and 2.8 times higher than those on non-hazy days. Also, single scattering albedo (SSA) also exhibited a higher value on hazy days. Diurnal variations of Scat.,  $A.$ , and SSA should attribute to the formation of secondary aerosols and the accumulation of black carbon on hazy days. Furthermore, the mean values of AOD during the whole period, hazy days, and non-hazy days were 0.78, 1.14, and 0.47, respectively. On basis of the analysis of air mass back trajectories, air masses with high speed came from northwest to northeast of Jinan during the non-haze days, whereas air masses with low speed came from southwest to southeast of Jinan. Therefore, those southerly air masses passed the wildfire spots in south of Shandong province would promote formation of the regional hazes, and changed the optical properties of aerosol particles in Jinan.

**Key words:** haze; absorption coefficient; scattering coefficient; aerosol optical depth (AOD); Jinan

气溶胶颗粒物作为城市大气污染的主要成分,不仅影响人体健康,而且通过对太阳辐射的吸收和散射,直接影响地球的辐射平衡,间接的影响云凝结核的形成,从而进一步改变云、雾的光学性质和生命周期<sup>[1-4]</sup>.目前,国内随着工业的快速发展,导致对流大气层中气溶胶的浓度不断增加,高浓度的气溶胶使得城市上空霾出现的频率不断增加,并成为一种新的气象灾害<sup>[5]</sup>.这种天气条

件不仅导致能见度差,并且危害人体健康<sup>[6]</sup>. Reid等<sup>[7]</sup>在研究由生物质燃烧引发的霾时,发现颗粒物的老化会改变气溶胶的物理、化学性质,并进一步改变光学性质.Chameides等<sup>[8]</sup>发现由

收稿日期: 2010-09-08

基金项目: 国家“973”项目(2005CB422203);山东省环境保护科技计划项目(2006045)

\* 责任作者, 工程院院士, wxwang@sdu.edu.cn

于厚厚的霾层降低了我国农业生产区地表的太阳辐射通量约为 5%~30%,并因此造成农业作物产量下降.因此,霾所引发的区域气候效应也逐渐的成为人们所关心的问题.

济南位于华北地区中心地带,同时也是环渤海  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物等大气污染物高排放强度地区的中心地带,能够代表华北乃至环渤海地区的大气污染状.因此,研究济南市霾天气条件下气溶胶的光学性质,对进一步了解我国北方大气气溶胶辐射强迫的不确定性具有典型意义.本研究为了获得采样点气溶胶的吸收系数和散射系数,同时利用了黑碳仪和浊度仪对山东省济南市秋季的大气气溶胶光学性质进行了观测,并进一步对比了霾与非霾天气的气溶胶光学特性.

## 1 实验方法

### 1.1 观测时间和地点

观测时间为 2009 年 10 月 11 日至 11 月 18 日,观测点设于山东大学环境研究院( $36^\circ 40' \text{N}$ ,  $117^\circ 03' \text{E}$ )楼顶,距离地面约 15m.采样点处于校园中部,周围为教学和生活区,无明显的污染源.

### 1.2 观测仪器

AE-21 型黑碳仪 (Aethalometer, Magee Scientific Co, USA)用于测量黑碳气溶胶(BC)浓度.其测量原理是利用黑碳气溶胶对光的强吸光特性,属于光学灰度测量法.该仪器可以连续实时观测黑碳气溶胶的质量浓度,每 5min 可以自动获得一个数据.采样过程中,气溶胶的切割粒径为 TSP.

M9003 积分浊度仪 (ECOTech, Australia)用于测量气溶胶颗粒的散射系数.该浊度仪采用超长寿命且稳定的发光二极管阵列 LED,波长 525nm.仪器装备内置的温度、压力、相对湿度测量,外置的加热进气管可控制仪器在一定的相对湿度以下进行测量,本实验将这一相对湿度设置为 60%.采样过程中,气溶胶的切割粒径为 TSP.

实验中还利用美国 TEOM 公司生产的 8500 对  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度进行了在线观测.PC-3 型便携式自动气象站同步获得了采样期间的各种气象数据.通过多次目测法获取了采样点周边大气

能见度的数据.

### 1.3 吸收系数的计算

吸收系数可以直接通过 Aethalometer 测量的衰减系数计算,或者间接通过仪器得到的 BC 浓度反算.吴兑等<sup>[9]</sup>在 2004 年利用 Aethalometer 与 Photoacoustic Spectrometer 进行对比,通过 BC 的浓度反算其在 532nm 时的吸收系数,计算式<sup>[8-9]</sup>如下:

$$A_{532}=8.28M_{\text{BC}}+2.23, R^2=0.92, \quad (1)$$

式中:  $M_{\text{BC}}$  为黑碳气溶胶的质量浓度,单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $A_{532}$  为 Photoacoustic Spectrometer 测量的气溶胶吸收系数,单位为  $\text{Mm}^{-1}$ .

通过式(1),将实验中在 880nm 处获得的 BC 浓度转化为 532nm 的吸收系数.

## 2 结果与讨论

### 2.1 观测期间霾天气与非霾天气中气溶胶的吸收系数、散射系数特征

图 1 为观测期间  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、气溶胶光学性质及主要的气象参数,如图 1 所示,济南大气气溶胶具有较高的吸收系数和散射系数,其均值分别为  $(54.9 \pm 44.7) \text{Mm}^{-1}$  和  $(428.5 \pm 315.8) \text{Mm}^{-1}$ .本次监测的吸收系数和散射系数具有比较一致的变化趋势,其最大值均出现在 10 月 30 日,分别为  $250.6 \text{Mm}^{-1}$  和  $2005.4 \text{Mm}^{-1}$ ,其最小值均出现在 11 月 2 日,分别为  $3.9 \text{Mm}^{-1}$  和  $18.1 \text{Mm}^{-1}$ .气象监测资料显示,观测期间南风逐渐减弱,北风逐渐加强.在这种气象条件的作用下,气溶胶的浓度出现明显的特征:10 月 11~13 日以南风 and 西南风为主,此时气溶胶浓度较高;10 月 14~21 日没有明显的主导风向,但较大的风速使得这段期间并没有出现严重的污染.之后的 10 月 23~31 日以西南风和静风为主,气溶胶浓度明显升高,并发生了严重的污染事件.11 月 1~11 日以东北风为主,风速较大,气溶胶浓度较低.但在 11 月 4~8 日出现了西南风和静风,在这期间气溶胶浓度有所升高.这表明观测期间气象条件对气溶胶浓度以及光学性质有较大的影响.当以西南风和静风为主时,气溶胶浓度明显升高;当以东北风为主时,气溶胶浓度明显降低.

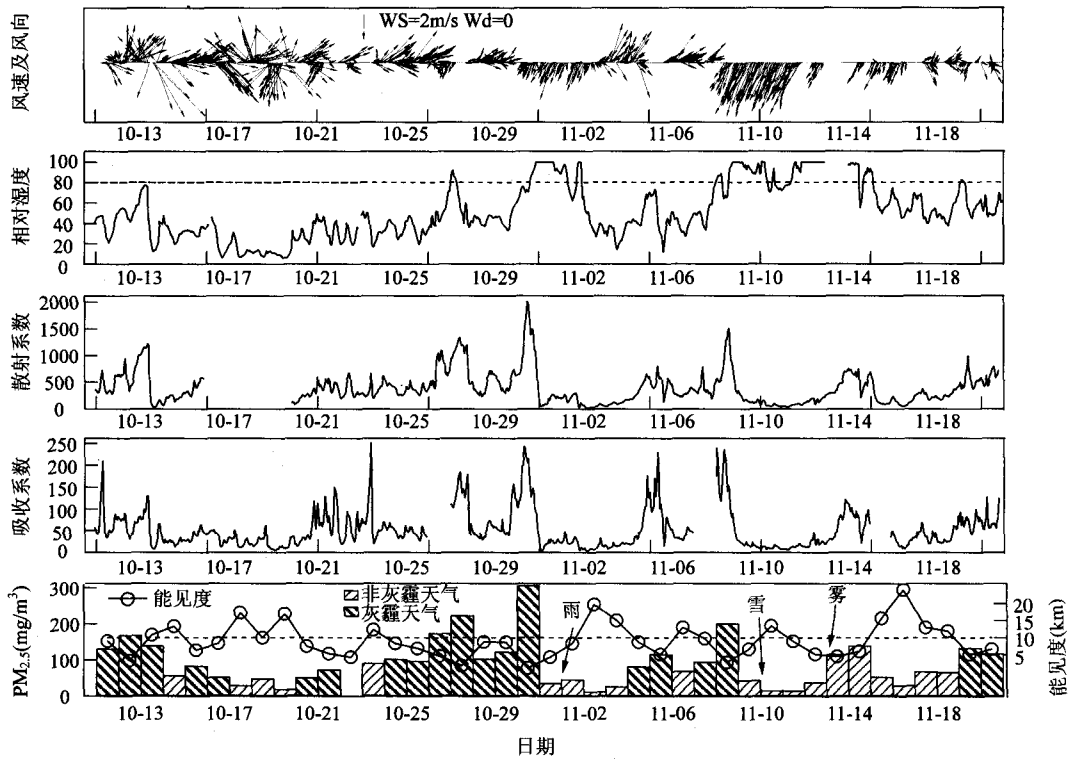


图1 观测期间  $PM_{2.5}$  质量浓度、气溶胶光学性质和主要气象参数的时间变化序列

Fig.1 Time-series variations of  $PM_{2.5}$  mass concentration, aerosol optical properties and main meteorological factors during 11 October to 20 November, 2009

表1 观测期间气溶胶光学性质、 $PM_{2.5}$  质量浓度统计值以及与文献报道的观测值的对比

Table 1 Statistical results of aerosol optical properties,  $PM_{2.5}$  mass concentration observed in this study and reported for other campaigns

地点	散射系数 $\sigma_s(Mm^{-1})$	吸收系数 $\sigma_a(Mm^{-1})$	单次散射反照率 SSA	$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$
北京 <sup>[13]</sup>	288±281 <sub>(525)</sub>	56±49 <sub>(532)</sub>	0.80±0.09	
广州 <sup>[11]</sup>	463±178 <sub>(545)</sub>	92±62 <sub>(532)</sub>	0.84±0.05	102.9±25.7
临安 <sup>[12]</sup>	353±202 <sub>(530)</sub>	23±14 <sub>(565)</sub>	0.93±0.04	90±47
Atlanta, USA <sup>[16]</sup>	121±48 <sub>(530)</sub>	16±12 <sub>(550)</sub>	0.87±0.08	31±12
Granada, Spain <sup>[17]</sup>	60±30 <sub>(550)</sub>	21±10 <sub>(550)</sub>	0.68±0.07	
Nagoya, Japan <sup>[15]</sup>	53.5±39.6 <sub>(530)</sub>	18.6±13.7 <sub>(550)</sub>	0.72±0.12	
Kwangju, Korea <sup>[14]</sup>	319±222 <sub>(520)</sub>	42±12 <sub>(880)</sub>	0.84–0.93	26.5±9.2
济南观测期间(本研究)	428.5±315.8 <sub>(525)</sub>	54.9±44.7 <sub>(532)</sub>	0.87±0.05	96.4±79.1
济南霾天气(本研究)	582.5±311.6 <sub>(525)</sub>	80.2±47.2 <sub>(532)</sub>	0.88±0.04	137.2±85.2
济南非霾天气(本研究)	205.7±134.8 <sub>(525)</sub>	31.0±25.8 <sub>(532)</sub>	0.85±0.04	52.9±39.1

注:表中括号内的数字为仪器测量光源的波长(nm)

将国内外文献中报道的观测值列于表1作为比较,济南市所得到的散射系数、吸收系数低于珠江三角洲的广州<sup>[11]</sup>,高于长江三角洲的临

安<sup>[12]</sup>.吸收系数与北京相当,但散射系数却远高于北京<sup>[13]</sup>.与国外的观测结果相比,除略高于 Kwangju<sup>[14]</sup>外,济南的散射系数、吸收系数要远远

高于 Atlanta、Granada、Nagoya<sup>[15-17]</sup>.

中国气象局颁布的气象标准中,排除降水、沙尘暴、浮尘、扬沙、烟幕、吹雪、雪暴等天气外造成的视障,将空气湿度 $<80\%$ 且大气能见度低于 10km 的天气现象判定为霾.相对湿度在 80%~95%时,则按照大气成分指标进一步判定<sup>[18]</sup>.如图 1 所示,根据观测的气象条件,共有 20d 被确定为霾天,15d 为非霾天,观测期间霾天气的发生率高达 57.1%.

观测期间霾天和非霾天的主要参数统计值汇于表 1,非霾天气中的  $PM_{2.5}$  质量浓度为  $(52.9 \pm 39.1)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、散射系数为  $(205.7 \pm 134.8)\text{Mm}^{-1}$ 、吸收系数为  $(31.0 \pm 25.8)\text{Mm}^{-1}$ ;而霾天气中  $PM_{2.5}$  质量浓度为  $(137.2 \pm 85.2)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、散射系数为  $(582.5 \pm 311.6)\text{Mm}^{-1}$ 、吸收系数为  $(80.2 \pm 47.2)\text{Mm}^{-1}$ .霾天气发生时这 3 个参数均有明显的升高,分别是非霾期间的 2.6、2.8 和 2.6 倍.因此,霾期间气溶胶消光系数的升高可能是造成霾期间能见度下降的直接原因.尤其是 10 月 25~31 日之间,气溶胶的吸收和散射系数值都比较高,并且在 10 月 30 日出现了最高值.除了气象因素外,二次气溶胶在霾期间的生成速率高于非霾期间,这也是气溶胶质量浓度增加的重要原因之一<sup>[19-20]</sup>,其结果将进一步导致整个大气霾层的散射强度增加.另外,霾期间黑碳气溶胶也会在大气停留过程中老化并混合有二次硫酸盐,这种混合会极大地增加黑碳气溶胶的吸收系数<sup>[21]</sup>.

## 2.2 霾与非霾天气吸收系数、散射系数和 SSA 日变化的对比

图 2 为气溶胶光学性质的日变化廓线.由图可见,吸收系数在非霾期间的最大值为  $44.5\text{Mm}^{-1}$ ,出现在早晨 7:00;最小值为  $20.3\text{Mm}^{-1}$ ,出现在 12:00.在霾期间的最大值为  $106.9\text{Mm}^{-1}$ ,出现在早晨 8:00;最小值为  $52.7\text{Mm}^{-1}$ ,出现在 16:00.两者都表明上班高峰期城市机动车排出的黑碳气溶胶会导致城市区域的颗粒物吸收系数增加.Moffet 等<sup>[22]</sup>在对洛杉矶城市大气气溶胶光学性质调查时也得到相似的结论,但是他们并没有发现在不同天气条件下峰值出现的时间不同.这可能是因为非霾轻污染天气条件下随着中午太阳辐射的加强,混合层高度的升

高,使得大气对流加强,污染物开始逐渐扩散,并在午后出现最低值( $20.3\text{Mm}^{-1}$ ).然而,在霾天气条件下,气溶胶质量浓度较高和大气层相对稳定,进一步导致了大气稀释能力较弱,这可以解释霾期间吸收系数的最小值出现滞后的现象.

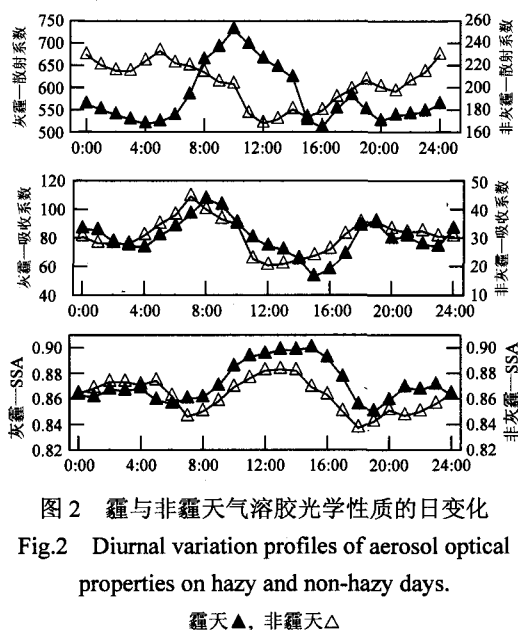


图 2 霾与非霾天气气溶胶光学性质的日变化  
Fig.2 Diurnal variation profiles of aerosol optical properties on hazy and non-hazy days.

霾天▲, 非霾天△

非霾天气中散射系数的最高值出现在早晨 5:00 左右,为  $232.9\text{Mm}^{-1}$ ,随后逐渐降低,12:00 出现最小值,为  $167.8\text{Mm}^{-1}$ .散射系数整体呈现出白天低,夜间高的特点.混合层高度是影响非霾天气散射系数的变化趋势的原因之一.相比于非霾天气的散射系数及霾天气的吸收系数,散射系数在霾天气表现出不同的变化趋势.例如,散射系数在清晨交通峰过后继续增长,10:00 达到最高值 ( $729.9\text{Mm}^{-1}$ ).这可能与二次气溶胶的转化速率在霾天气中较高有关<sup>[19]</sup>.当 10:00 前大气层中气溶胶的生成速率大于扩散速率时,散射系数就会持续增长,反之就会下降.10:00 之后散射系数下降并在 16:00 时达到最低值( $509.701\text{Mm}^{-1}$ ),这是由于大气扩散的加强,使得污染物的扩散速率逐渐大于生成速率,导致散射系数逐渐降低.

SSA 定义为散射系数与消光系数之比,它对于评估气溶胶的直接辐射强迫有重要的意义.在非霾与霾天气中,SSA 具有相似的日变化峰形.即

中午逐渐增加并在 14:00~15:00 具有最大值,早晚交通峰时降低并在 18:00~19:00 具有最小值.这种变化趋势说明早、晚 SSA 的降低与交通峰排放出的大量黑碳颗粒物有关<sup>[23]</sup>,中午 SSA 的升高则说明观测点可能存在着光化学反应使得大量的新颗粒生成,使得该区域的大气气溶胶更具散射性<sup>[10]</sup>.而霾天更高的污染物浓度及二次气溶胶的转化速率使得霾天有更高的 SSA.

### 2.3 气溶胶光学厚度的估算

气溶胶光学厚度是评估气溶胶直接辐射强迫的重要因子,它定义为气溶胶的消光系数在垂直方向上的积分.因此,从地面到 H 高度上的 AOD( $\tau$ )则为:

$$\tau = \int_0^H ((\sigma_{ap}(z) + \sigma_{sp}(z)) dz^{[24]} \quad (2)$$

表 2 观测期间不同天气条件下的 AOD 值  
Table 2 AOD values at different weather

天气条件	AOD 值
观测期间 AOD 均值	0.78
霾期间 AOD 值	1.14
非霾期间 AOD 值	0.47
MODIS 观测的 AOD 值	0.62

利用 Xue 等<sup>[25]</sup>在山东省航测中获得的在垂直高度的散射系数廓线,并结合本次地面观测气溶胶的消光系数,对本次研究区域的大气气溶胶光学厚度进行了估算.估算方法按照式(2),即在垂直高度上对消光系数进行积分,获得 AOD 的数值,结果如表 2 所示.整个观测期间的气溶胶光学厚度平均值 0.78.另外,MODIS 卫星显示观测期间 AOD 值为 0.62,与估算的 AOD 的比值约为 0.80,这与王莉莉等<sup>[26]</sup>利用中国地区太阳分光观测网得到的中国东部地区内陆城市卫星观测的 AOD 与地面观测的 AOD 的比值是相似的.Xin 等<sup>[27]</sup>观测到北京、上海、兰州和香河的 500nm 的年均 AOD 为 0.50,0.64,0.69 和 0.44.和先前观测结果相比,本次在山东济南观测的 AOD 要高于其他城市,尤其是在霾期间,AOD 高达 1.14.这说明济南地区的垂直上空负载着较高浓度的气溶胶.非霾期间 AOD 值为 0.47,这接近于郊区香

河站点的 AOD 测量值.由于在不同的天气状况下,消光系数的垂直廓线都会发生变化,这使得本实验的估算值具有一定的局限性.

### 2.4 霾和非霾期间后向轨迹分析

图 3 为观测期间 48h 后向轨迹图,结果显示,霾天气所有的气流轨迹均来自于济南西南至东南的扇形区域,而非霾天气的气流轨迹来自于济南的西北至东北方向的扇形地区.这些后向轨迹与图 1 中所示的风速风向有很好的 consistency.后向轨迹还显示非霾天气中的气流大部分是来自高空,且运动距离远大于霾天的气流.这表明来自于西北和东北高空的清洁气流运动速度较快,有利于污染物扩散.相反,来自南方的气流运动多来自于污染较重的低层大气,运动相对缓慢,大气污染容易发生聚集.

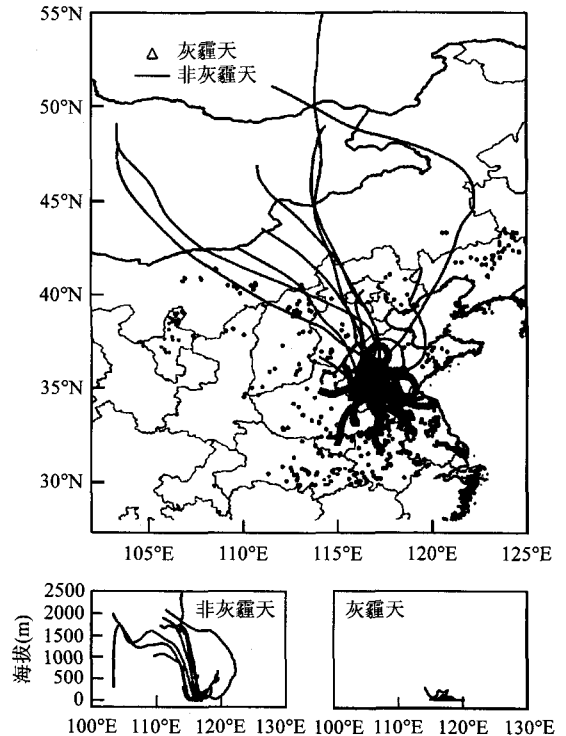


图 3 霾与非霾期间的 48h 后向轨迹及观测期间 MODIS 火点分布

Fig.3 48h air mass back trajectories on hazy and non-hazy days, and MODIS fire map during the sampling period, Black dots represent the fire spots

黑色圆点代表火点位置

MODIS 卫星火点图显示大量的火点分布在山东南部及河南、江苏和安徽等省份(<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>),这是由于采样期间正值中国北方秋收过后,农业秸秆燃烧普遍存在.因此,当来自这些区域的气流到达济南时,不仅会携带秸秆燃烧释放的颗粒物和气体污染物,而且较小的风速不利于污染物扩散,这些都会加剧霾的产生<sup>[22]</sup>.例如,图 1 中所示 10 月 25~31 日连续出现霾天气并且有逐渐加重趋势,相应的时间段火点分布密度增加,这说明来自西南的风很可能携带了大量的秸秆燃烧释放物并贡献到山东区域霾中.

### 3 结论

**3.1** 2009 年 10 月 11 日至 11 月 18 日期间,观测得到的济南大气气溶胶的吸收系数与散射系数均值分别为 $(54.9 \pm 44.7) \text{Mm}^{-1}$ 和 $(428.5 \pm 315.8) \text{Mm}^{-1}$ .观测期间霾天气的发生率为 57.1%,霾天气和非霾天气的散射系数和吸收系数平均值分别为 $(582.5 \pm 311) \text{Mm}^{-1}$ 、 $(680.2 \pm 47.2) \text{Mm}^{-1}$ 和 $(205.7 \pm 134.8) \text{Mm}^{-1}$ 、 $(31.0 \pm 25.8) \text{Mm}^{-1}$ ,气溶胶消光系数的增加是造成霾天气能见度降低的直接原因.

**3.2** 霾和非霾天气的气溶胶吸收系数日变化受到早、晚交通峰的影响明显.非霾天气散射系数夜间高,日间低;霾天气散射系数日间高,夜间低.这可能是与霾天气大气稳定以及二次气溶胶的大量生成有关.SSA 在 2 种天气下都呈现出中午高,早晚交通峰低的变化趋势,但霾天气的数值高于非霾天气.

**3.3** 对观测期间的 AOD 值进行了估算,得出 AOD 在观测期间的平均值为 0.78,霾期间为 1.14,非霾天气为 0.47.观测期间的 AOD 均值高于其他城市相关的报道值,说明济南上空存在高浓度的气溶胶.

**3.4** 后向轨迹分析显示,非霾期间气流主要来自济南的西北至东北,且运动速度快;而霾天气所有的气流均来自济南西南至东南,且运动速度慢.MODIS 卫星火点图显示大量的火点分布在山东地区南部及河南、江苏和安徽等地区,经过这些地区携带高浓度气溶胶的气流到达济南后,

促进了霾天气的形成.

### 参考文献:

- [1] Penner J, Dong X, Chen Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect [J]. *Nature*, 2004, 427(6971):231-234.
- [2] Kaiser D, Qian Y. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954-1998: Indication of increased haze pollution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002,29(21):2042-2053.
- [3] 贾 璇,王文彩,陈勇航,等.华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响 [J]. *中国环境科学*, 2010,30(8):1009-1014.
- [4] 蔡子颖,郑有飞,胡 鹏,等.郑州地区大气气溶胶光学特性的地基遥感研究 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(1):31-35.
- [5] 吴 兑.大城市区域霾与雾的区别和霾天气预警信号发布 [J]. *环境科学与技术*, 2008,31(9):1-7.
- [6] 谭吉华.广州灰霾期间气溶胶物化特性及其对能见度影响的初步研究 [D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [7] Reid J, Hobbs P, Ferek R, et al. Physical chemical and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998,103(D24):32059.
- [8] Chameides W, Yu H, Liu S, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999,96(24):13626.
- [9] 吴 兑,毛节奏,邓雪娇,等.珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 2009,39(11):1542-1553.
- [10] Yan P, Tang J, Huang J, et al. The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008,8(8):2229-2242.
- [11] Andreae M, Schmid O, Yang H, et al. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(25):6335-6350.
- [12] Xu J, Bergin M, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002,36(2):161-173.
- [13] He X, Li C C, Lau A K H, et al. An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009,9(22):8903-8915.
- [14] Kim K, He Z, Kim Y. Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D19):D19S02. doi:10.1029/2003JD003693
- [15] Khatri P, Ishizaka Y, Takamura T. A Study on Aerosol Optical Properties in an Urban Atmosphere of Nagoya, Japan [J]. *Journal*

- of the Meteorological Society of Japan, 2009,87(1):19-38.
- [16] Carrico C, Bergin M, Xu J, et al. Urban aerosol radiative properties: Measurements during the 1999 Atlanta Supersite Experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, 8422. doi:10.1029/2001JD001222
- [17] Lyamani H, Olmo F, Alados-Arboledas L. Physical and optical properties of aerosols over an urban location in Spain: seasonal and diurnal variability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010,10:239-254.
- [18] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. QX/T 113-2010 霾的观测和预报等级 [S]. 北京:气象出版社, 2010.
- [19] Sun Y, Zhuang G, Tang A, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006,40(10):3148-3155.
- [20] 李丽珍,沈振兴,杜娜,等.霾和正常天气下西安大气颗粒物中水溶性离子特征 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007,24(5): 674-679.
- [21] Li W, Shao L. Direct observation of aerosol particles in aged agricultural biomass burning plumes impacting urban atmospheres [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2010:10589-10623.
- [22] Moffet R, Prather K. In-situ measurements of the mixing state and optical properties of soot with implications for radiative forcing estimates [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009,106(29):11872-11887.
- [23] Garland R, Yang H, Schmid O, et al. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: implications for regional air pollution, radiative forcing and remote sensing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(16):5161-5186.8
- [24] Magi B, Hobbs P, Schmid B, et al. Vertical profiles of light scattering, light absorption, and single scattering albedo during the dry, biomass burning season in southern Africa and comparisons of in situ and remote sensing measurements of aerosol optical depths [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, 8504, doi:10.1029/2002JD002361.
- [25] Xue, L, Ding A, Gao J, et al. Aircraft measurements of the vertical distribution of sulfur dioxide and aerosol scattering coefficient in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009:278-282.
- [26] 王莉莉,辛金元,王跃思等.CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性 [J]. *科学通报*, 2007,52(004): 477-486.
- [27] Xin J, Wang Y, Li Z, et al. AOD and Angstrom exponent of aerosols observed by the Chinese sun hazemeter network from August 2004 to September 2005[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112.doi:10.1029/2006JD007075

**作者简介:** 徐政(1986-),男,山东新泰人,山东大学环境研究院硕士研究生,研究方向为大气环境化学.

## 关于《中国环境科学》网上投稿的通知

《中国环境科学》编辑部为提高稿件处理的网络化水平和采编工作的效率,及时让作者了解稿件的处理情况,自2008年3月1日起已开通网上投稿查稿系统,请登陆网址: <http://www.zghjcx.com.cn> 点击“作者在线投稿”进行注册后再按要求投稿,点击“作者在线查稿”进行查询.本刊不再接受纸件投稿和电子版稿件的E-mail投稿.特此通知.

《中国环境科学》编辑部