

气象条件对上甸子地区气溶胶散射特征的影响

赵秀娟, 张小玲*, 蒲维维, 孟伟

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要:利用北京地区上甸子站气溶胶散射系数、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和气象要素 1 a 的观测资料, 研究不同天气条件下上甸子地区散射系数的变化特征, 并讨论了气象条件对散射系数的影响。结果表明, 散射系数在雾霾天最高 608.4 Mm^{-1} , 其次为雾天 500.6 Mm^{-1} 和霾天 423.7 Mm^{-1} , 是一般天气散射系数的 6.4~9.2 倍。在各类天气中散射系数均在夏季最高, 雾天和雾霾天分别是秋、冬季最低, 霾天和一般天气中其他 3 个季节相差不大。 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量散射效率在雾天和雾霾天较高, 且雾天的季节变化最明显。散射系数在雾霾天和一般天气中分别呈“单峰型”和“双峰型”的日变化特征。上甸子地区气溶胶散射系数受地面风的影响显著, 在雾霾等低能见度天气中, 强西南风对气溶胶的输送是造成上甸子及区域内散射系数水平较高的主要原因, 偏东北方向的风有利于散射系数的降低, 这种作用在一般天气中表现最为显著。

关键词: 散射系数; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度; 质量散射效率; 风向; 风速

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3153-07

Effect of Weather Condition on the Aerosol Scattering Property at Shangdianzi

ZHAO Xiu-juan, ZHANG Xiao-ling, PU Wei-wei, MENG Wei

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: A study on the effect of weather condition on the aerosol scattering property has been carried out using one year measurement data sets of aerosol scattering coefficient (ASC) and meteorological parameters at Shangdianzi (SDZ). The results showed that the ASC was highest in haze-fog day with 608.4 Mm^{-1} and higher in fog day with 500.6 Mm^{-1} and haze day with 423.7 Mm^{-1} those were 6.4~9.2 times higher than the ASC in normal day. The ASC was highest in summer in all kinds of weather conditions. The lower ASC in fog day and haze-fog day was observed in autumn and winter, respectively. There was no evident difference of the ASC between other three seasons in haze day and normal day. Pronounced seasonal variation of the mass scattering efficiency (MSE) of $\text{PM}_{2.5}$ was observed in fog day with the highest value in summer. Significant diurnal variations in ASC were observed in haze-fog day and normal day with a unimodal pattern and a bimodal pattern, respectively. The wind was the most important factor for the ASC at SDZ. The transport of aerosol particles by the strong southwest wind should be responsible for the higher level of ASC in SDZ area and regional scale in low visibility weather conditions. The northeast wind was favourable to the reduction of ASC, especially in normal day.

Key words: scattering coefficient; $\text{PM}_{2.5}$ concentration; mass scattering efficiency; wind direction; wind speed

大气气溶胶通过直接辐射强迫和间接辐射强迫影响着地球的辐射平衡^[1]。气溶胶的直接辐射强迫是指人为活动产生的气溶胶通过散射和吸收造成的地球辐射平衡的变化。人为气溶胶的全球年平均直接辐射强迫值与温室气体增加导致的辐射强迫的估值在数量上相当, 而作用相反^[2]。由于气溶胶物理化学特性的时空差异极大, 要正确评估气溶胶产生的辐射强迫就需要在全球范围不同尺度上进行连续的、高时间分辨率的气溶胶理化特性的观测。

散射系数是气溶胶光学性质的重要参数之一, 它反映了气溶胶对辐射传输的影响。大型气溶胶特征试验 ACE 系列和 INDOEX 等^[3,4]均开展了气溶胶散射系数的观测。Charlson^[5]和 Delene 等^[6]研究了北美地区的气溶胶散射系数时空分布规律, Sisler 等^[7]分析了气溶胶组分对散射系数的贡献。国内研究报道了部分城市地区和本底地区气溶胶散射系数

的基本变化特征^[8~13], 在北京地区还开展了气溶胶散射系数亲水增长特性及散射系数对能见度的影响研究^[14,15], 然而对不同的气象条件造成大气气溶胶浓度和性质的改变, 进而影响到气溶胶散射特性的变化的研究开展还较少。

本研究主要目标是阐述不同天气条件下上甸子地区气溶胶散射系数的变化特征, 并探讨地面风对散射系数的影响。

1 材料与方法

1.1 观测站点

收稿日期: 2010-12-15; 修订日期: 2011-03-02

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8092010); 城市气象科学研究基金项目(UMRF200805); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806027); 国家自然科学基金项目(40675082)

作者简介: 赵秀娟(1977~), 女, 副研究员, 主要研究方向为大气环境, E-mail: xjzhao@ium.cn

* 通讯联系人, E-mail: xlzhang@ium.cn

北京上甸子区域大气本底站是世界气象组织区域大气本底观测站之一,该站位于北京市东北部的密云县高岭镇上甸子村(E 117°07', N 40°39', 海拔高度 293.3 m),距密云县城 55 km,距北京市区直线距离约 100 km. 该站座落于山的南侧,三面环山,仅西南方向为平原,由于地形作用,该站常年盛行东北和西南风,因此在西南风作用下,来自北京城区和周围区县的污染物很容易被输送到上甸子地区,而来自其他方向的气团则相对较为清洁.

1.2 观测仪器与方法

利用 M9003 浊度计(澳大利亚 ECOTECH 公司)进行波长为 525 nm 的气溶胶散射系数连续观测,仪器测量范围为 0~2 000 Mm⁻¹,积分角度为 0°~170°. 对一般大气气溶胶细粒子,浊度仪由于积分角度不理想带来的截断误差不大于 10%. 观测中浊度仪每日自动进行定时零点检查,每周进行人工跨点检查,跨点检查采用厂家推荐标准气. 测量时相对湿度保持在 60% 以下,由仪器自带加热系统对进气管湿度控制. 当空气相对湿度低于 60% 时,气溶胶通常以“干”状态存在于大气中,因此本研究针对“干”气溶胶的散射特征进行分析. PM_{2.5}浓度选用美国 Rupprecht & Patashnik 公司生产的 1400a TEOM (tapered element oscillating microbalance) 仪器观测 PM_{2.5},该仪器每周检查一次流量和滤膜负载率,当滤膜负载率超过 30% 时,即进行更换.

能见度数据采用 Visala 的 FD12 能见度仪观测获得,该仪器是通过测量红外线光束对空气中颗粒质点(固体和液体)的散射获得气象光学能见度,是一种前散射测量仪,对能见度的探测范围是 10~50 000 m.

利用上述仪器获取了上甸子 2007-06-01~2008-05-31(北京时间,下同)期间气溶胶散射系数、PM_{2.5}浓度和水平能见度,同期还获得了气象要素的观测资料. 散射系数和 PM_{2.5}采集的数据为 5 min 平均值,能见度数据为 10 min 平均值,统计平均后得到小时平均值. 本研究主要关注低能见度天气与其他天气中散射系数的变化特征,因此笔者根据人工天气记录,并综合考虑能见度观测数据,将天

气过程分为:雾天、霾天、雾霾天和“一般天气”这 4 种天气类型进行讨论. 雾天的定义是该日天气现象记录只有雾(包括轻雾和雾);霾天即该日天气现象记录中只有霾;雾霾天则是 1 d 的记录中有轻雾又有霾;且这三类低能见度天气中基于能见度低于 10 km 的原则进行小时数据的筛选. 剩余样本在剔除雨天、沙尘天等特殊天气之后,将没有明显天气现象记录的数据作为“一般天气”进行分析. 特别说明的是,本研究讨论的是不同气象条件下“干”气溶胶本身的散射特性,并不考虑由于相对湿度增加造成气溶胶吸湿增长引起的水汽分子间接散射效应的影响^[16],在不同气象条件下,除了相对湿度会有明显变化以外,气溶胶本身也会存在物理化学特性上的不同,其散射特性的变化是本研究的重点.

2 结果与讨论

2.1 气溶胶散射系数的季节特征

表 1 给出了雾天、霾天、雾霾天和一般天气中散射系数、PM_{2.5}浓度的平均值以及 PM_{2.5}的质量散射效率(MSE),其中 MSE 是利用最小二乘法对 PM_{2.5}浓度与散射系数进行拟合得到的线性方程的斜率^[17],并给出了线性拟合的相关系数. 统计结果表明在三类低能见度天气中雾霾天的散射系数最高,其次为雾天,霾天相对较低,但均远高于一般天气的散射系数,分别约为后者的 9.2、7.6 和 6.4 倍,这也是造成能见度较低的重要原因之一. 已有研究表明,气溶胶的散射大部分来自细粒子的贡献,从细颗粒物 PM_{2.5}的浓度变化来看,其在雾霾天最高,其次为霾天,但浓度比较接近,在 110 μg·m⁻³左右,雾天相对较低为 82.9 μg·m⁻³,三类低能见度天气的 PM_{2.5}浓度比一般天气的浓度高了 4~5 倍左右. 在三类低能见度天气中 PM_{2.5}的散射效率分布在 3.8~4.6 m²·g⁻¹之间,与 Chow 等^[17]在美国加利福尼亚的观测结果 4.9 m²·g⁻¹比较接近,明显高于一般天气情况下的 2.9 m²·g⁻¹,这可能是此类低能见度天气中颗粒物散射性气溶胶含量增加造成的,气溶胶具有更高的光散射能力^[18].

表 1 不同气象条件下散射系数、PM_{2.5}浓度平均值和质量散射效率(MSE)

Table 1 Averages of scattering coefficient and PM _{2.5} concentration and mass scattering efficiency (MSE) under different weather conditions					
天气类型	样本量/h	散射系数/Mm ⁻¹	PM _{2.5} 浓度/μg·m ⁻³	MSE/m ² ·g ⁻¹	相关系数
雾	981	500.6 ± 308.4	82.9 ± 46.3	4.6	0.68
霾	461	423.7 ± 180.8	105.0 ± 42.1	3.8	0.87
雾霾	752	608.4 ± 319.4	122.2 ± 49.6	4.4	0.66
一般天气	4 050	65.9 ± 64.2	21.5 ± 18.1	2.9	0.80

由图 1 可见,在各类天气中气溶胶散射系数均在夏季最高,在雾天、霾天、雾霾天和一般天气中分别为 564.6、640.8、821.7 和 120.1 Mm^{-1} ,其次雾天是春冬季,雾霾天为春秋季节,霾天和一般天气中散射系数在其他 3 个季节相差不大.这可能是夏季温湿度高,太阳辐射增强,气粒转化反应增强,使得气溶胶中二次气溶胶如硫酸盐、硝酸盐含量增加,气溶胶具有更高的光散射能力^[19]. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与散射系数的季节特征基本相似,但在雾天明显不同,其在夏季最低,冬季最高,春秋季节居中.通过分季节拟合得到了 $\text{PM}_{2.5}$ 质量散射效率(MSE)的季节变化特征,雾天季节变化特征最明显,MSE 在夏季最高为 $7.7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,约为其他季节的 2 倍,这可能与夏季雾天高温湿度造成的高散射能力的气溶胶成分增加有关.雾霾天 MSE 在春夏季较高,秋冬季次之,霾天 $\text{PM}_{2.5}$ 的散射效率季节变化不明显,春季相对较低,一般天气中春季散射效率明显低于其他季节,这可能与春季风大,气溶胶中矿物质成分增多,散射能力相对较弱有关.

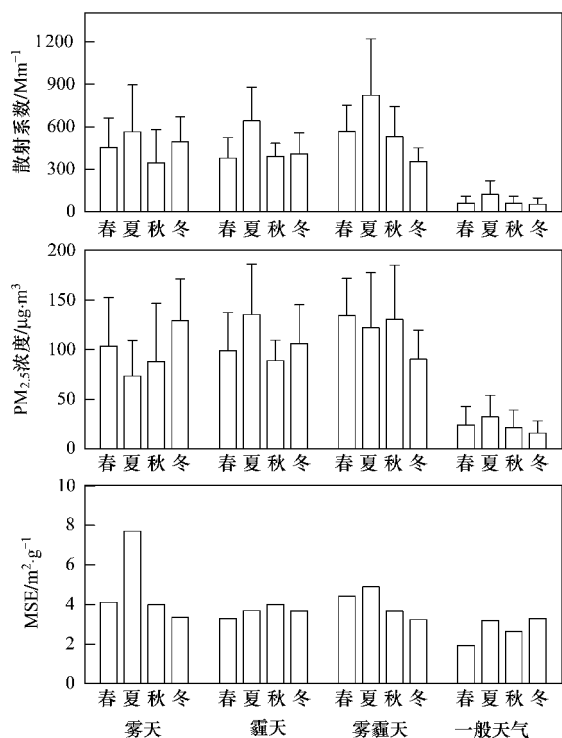


图 1 散射系数、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与质量散射效率(MSE)的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of scattering coefficient, $\text{PM}_{2.5}$ concentration and MSE

2.2 气溶胶散射系数的日变化特征

为了分析气溶胶散射系数的日变化特征,根据

4 类天气类型进行了分类统计. 总体上散射系数的日变化分为 2 种类型,即单峰型和双峰型. 但是从统计的样本数来看,在雾天和霾天小时样本量在 1 d 中存在一定差异,霾天 13:00 ~ 23:00 时出现霾的小时数明显多于 00:00 ~ 12:00 时的情况,而雾天则相反,这反映了气溶胶和水汽在两类天气中的不同作用,上甸子地区在雾霾类天气中下午多盛行西南风(图 2),霾天从南部城市地区输送来的气溶胶造成能见度降低,使得出现霾记录的样本增多,而雾天由于水汽对降低能见度的作用更大,所以雾的样本更多出现在夜间相对湿度高的时段. 从小时平均量来看,雾天气溶胶散射系数的变化范围在 $459.8 \sim 565.9 \text{ Mm}^{-1}$ 之间,霾天为 $345.0 \sim 489.1 \text{ Mm}^{-1}$,散射系数白天高,夜间低,高值多出现在下午,这与下午多盛行偏南风造成气溶胶颗粒物的输送有关. 雾霾天和一般天气中小时样本量分布均匀,因此本研究对这两类天气进行了重点讨论. 图 2 给出了观测期间雾霾天和一般天气中散射系数、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及相关气象要素的日变化,其中风向的小时平均值采用了矢量平均风向计算方法得到^[20]. 可以看出,雾霾天气溶胶散射系数的日变化范围在 $554.1 \sim 689.0 \text{ Mm}^{-1}$ 之间,一般天气为 $58.8 \sim 74.8 \text{ Mm}^{-1}$. 在雾霾天,散射系数的日变化表现为“单峰型”,白天高,夜间低,自 10:00 时后明显增加,到 15:00 时左右达到最高值. 对应气象要素的日变化可以发现,散射系数在白天的增加过程与偏南风出现的时间基本一致,并随风速增加而逐渐增加,在偏南风最强的 15:00 时前后散射系数出现了最高值,随后偏南风开始减弱,散射系数逐渐降低,夜间转为偏北风,加之夜间颗粒物干沉降增强,散射系数和颗粒物浓度出现明显下降. 通过分析表明在这类天气中,风的日变化是造成散射系数日变化的主要原因. 一般天气中散射系数的日变化具有明显的“双峰型”特征,早高峰出现在 06:00 ~ 10:00 时之间,13:00 时左右出现最低值,随后开始增加,在 20:00 时左右达到最高,23:00 时以后明显下降. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日变化与散射系数基本一致. 对应气象要素的日变化来看,散射系数早高峰出现时段没有明显的风向变化,相对湿度也呈下降趋势,因此可能是局地排放产生的气溶胶造成了散射系数的增加. 日出后随着边界层的发展,温度、风速开始增加,在 13:00 时左右散射系数和颗粒物浓度同时达到最低,下午风向转为偏南风,颗粒物输送增强,且边界层高度随之降低,使得颗粒物浓度和散射系数同时增加,傍晚达到最高,随后伴随偏北风

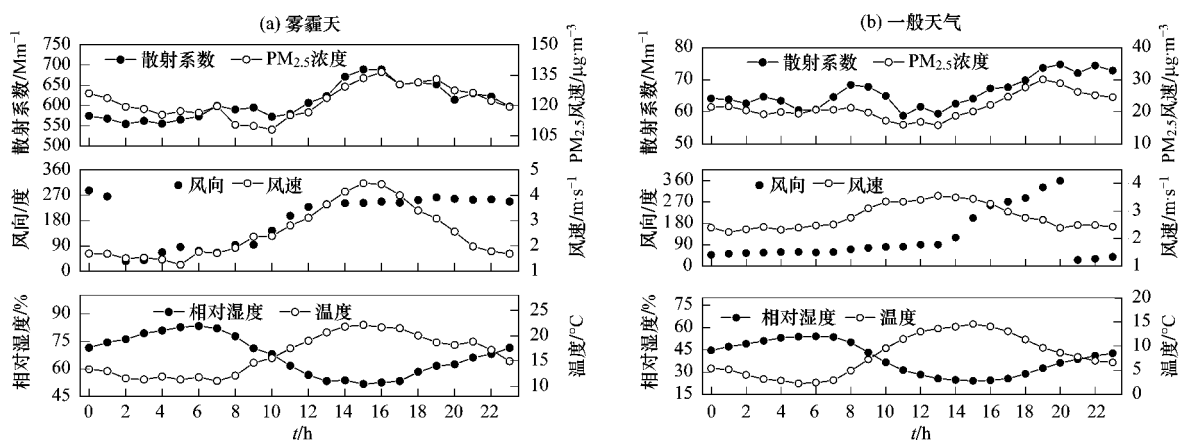


图2 雾霾天与一般天气中散射系数、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及气象要素日变化

Fig.2 Diurnal variations of scattering coefficient, $\text{PM}_{2.5}$ concentration and meteorological parameters:
haze-fog day and normal day

的扩散清除及夜间干沉降增强,二者开始降低.在一般天气中,散射系数的日变化是局地排放、边界层发展与风向日变化综合作用的结果.

2.3 地面风对散射系数的影响

图3是上甸子观测期间4类天气条件下风向玫瑰图,从中可以看出,上甸子地区总体以NE-ENE-E和SW-WSW-W扇区为主导风(为了便于叙述,本研究将这2个扇区分别缩写为NEE和SWW),但雾霾类天气SWW风向出现频率更高,而一般天气则是NEE风向频率相对更高.风速小于或等于 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时看作静风.雾天与雾霾天静风出现频率高于霾天和一般天气,但总体上各类天气中静风出现频率不高.图4和图5是气溶胶散射系数随风向的

变化图,C表示静风,其中从下到上分别表示1分位、5分位、25分位、中值(50分位)、平均值(空心方框)、75分位、95分位和99分位的变化.从图4中可以看出,霾天SWW扇区的气溶胶散射系数略高于NEE扇区,但二者相差不大,表明霾天区域内气溶胶散射系数分布相对比较均一,平均值在 400 Mm^{-1} 左右.雾天时SWW扇区的散射系数平均值和中值都明显高于NEE扇区,平均值在 600 Mm^{-1} 左右,NEE扇区平均值在 400 Mm^{-1} .雾霾天与雾天相似,SWW和NEE扇区散射系数平均值分别在 650 和 500 Mm^{-1} 左右.一般天气情况下,气溶胶散射系数随风向由北向南呈明显增加的分布趋势,在SWW扇区最高,平均值约为 120 Mm^{-1} 左右,是NEE扇区的2.5倍左右.静风在各类天气中出现频率不高,但静风时气溶胶散射系数也处于较高水平.从气溶胶散射系数随风速的变化来看(图5),三类低能见度天气中NEE风向的风速明显低于SWW风向,一般天气中NEE和SWW风向的风速范围基本相同.霾天散射系数高值出现在偏西南风向上 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下和 $4\sim6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,NEE方向上风速在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上散射系数才出现明显的降低趋势.雾天SWW风向上气溶胶散射系数与静风条件下接近,NEE方向上风速 $>1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,散射系数明显降低.雾霾天当SWW风向上风速在 $3\sim6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时散射系数比静风条件下要高,且在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右出现最高值.一般天气条件下,SWW方向上气溶胶散射系数维持在较高的水平上,风速达到 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上时,散射系数明显增加,而在NEE方向上散射系数随风速的增加逐

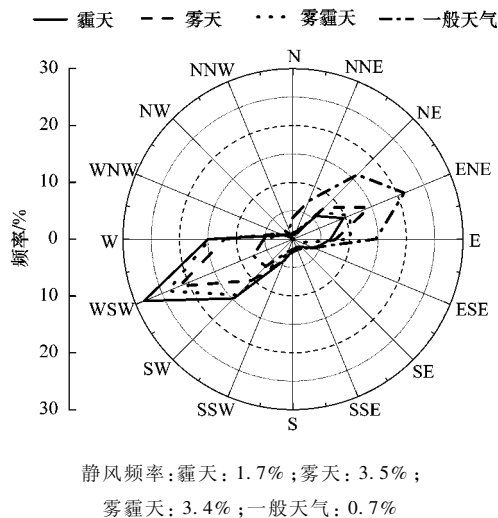


图3 风向频率分布

Fig.3 Frequency distribution of wind direction

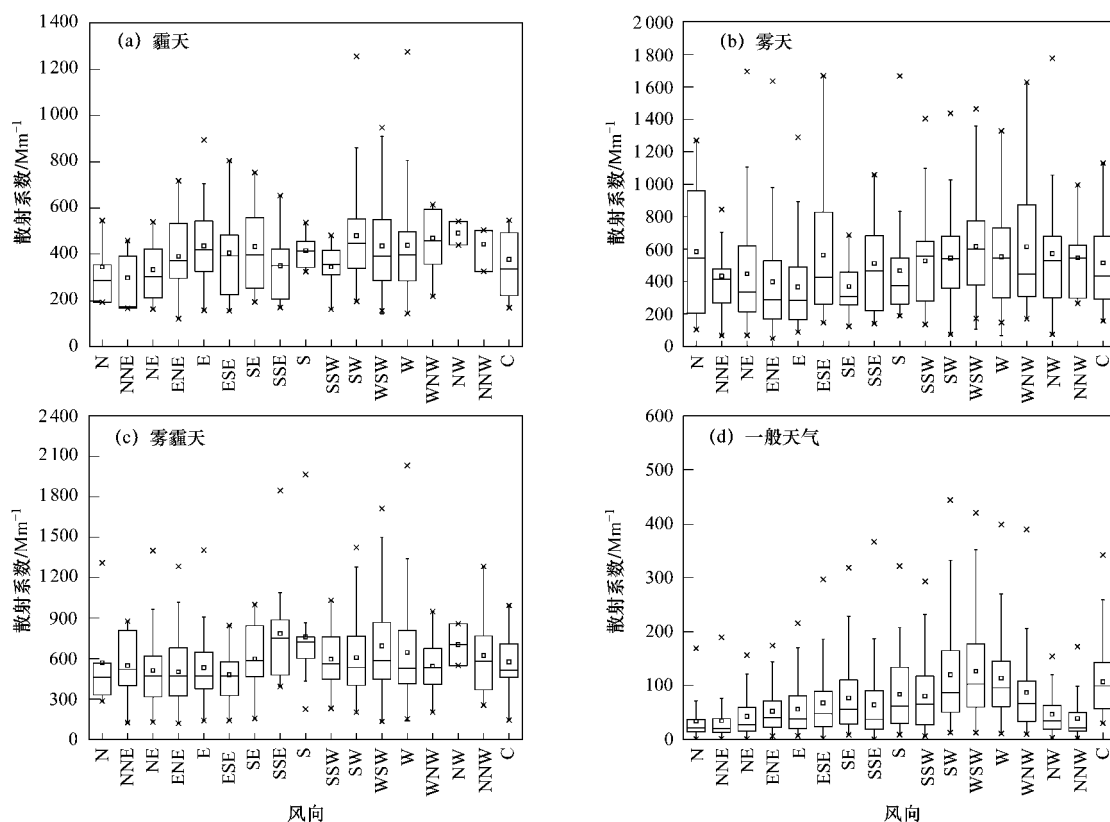


图4 散射系数随风向变化

Fig. 4 Scattering coefficient variation with wind direction

渐降低,当风速 $>4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 散射系数平均值迅速减小. 气溶胶散射系数随风向和风速的变化,体现了大气输送过程对上甸子气溶胶的不同影响. 雾霾等三类低能见度天气中,气溶胶散射系数总体上位于较高水平,表明区域内气溶胶含量都比较高,但是SWW方向散射系数高于NEE方向,且SWW方向风的频率更高,风速更强,在增加扩散的同时也将南部城市地区的气溶胶向北部地区输送,使得上甸子地区散射系数在偏西南风时相对更高,强西南风的输送也是造成此类天气区域内散射系数整体水平较高的主要原因^[18]. 一般天气时,散射系数随风向和风速的变化最显著,偏西南风对气溶胶颗粒物的输送作用非常明显,在该方向上散射系数明显处于高位,且随风速增加逐渐增高,而偏东北方向上,城市相对较少,空气清洁,随着NEE风速增加,大气输送的清洁空气对气溶胶颗粒物起到显著的扩散稀释作用,使得上甸子地区散射系数迅速降低.

3 结论

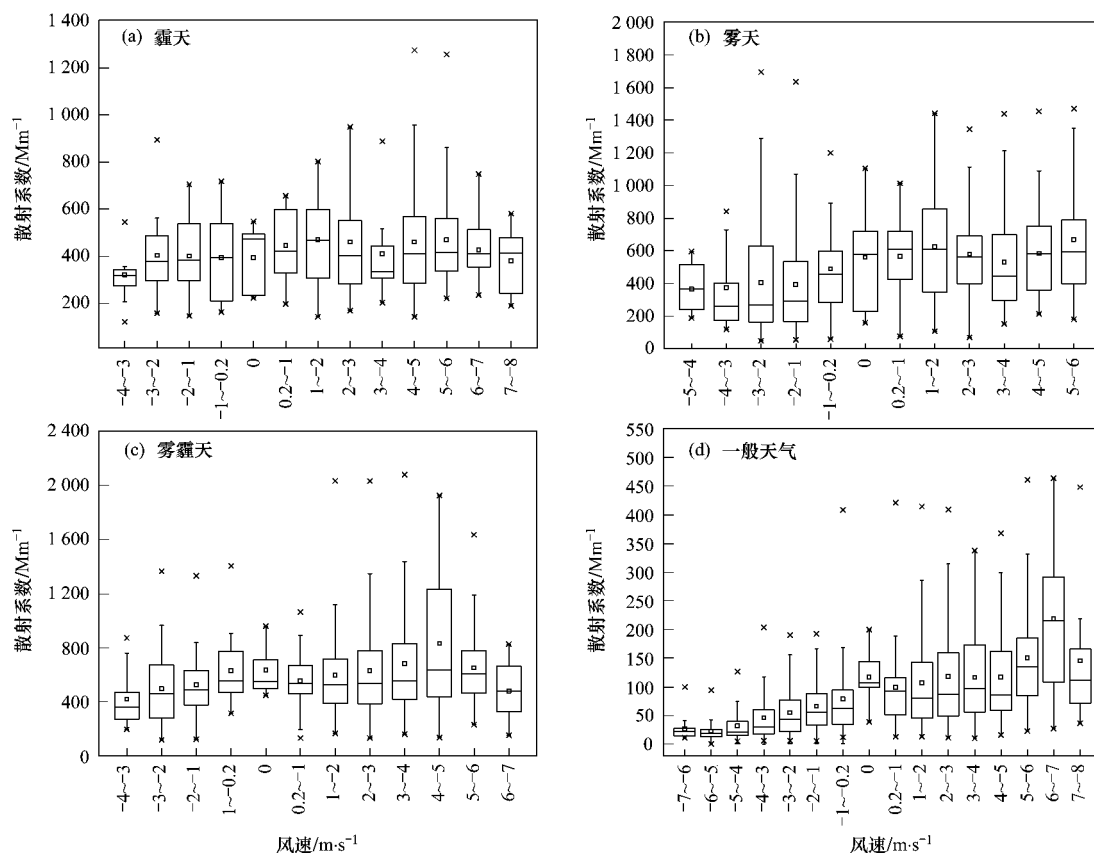
(1) 观测期间,雾霾天的散射系数最高为

$(608.4 \pm 319.4) \text{ Mm}^{-1}$, 其次为雾天 $(500.6 \pm 308.4) \text{ Mm}^{-1}$ 和霾天 $(423.7 \pm 180.8) \text{ Mm}^{-1}$, 一般天气的散射系数为 $(65.9 \pm 64.2) \text{ Mm}^{-1}$, 前三者分别为后者的9.2、7.6和6.4倍.

(2) 气溶胶散射系数在雾霾天和一般天气中分别呈“单峰型”和“双峰型”的日变化特征. 在雾霾天散射系数下午最高,夜间最低,西南部污染物的输送是下午峰值出现的主要原因. 一般天气中散射系数的早高峰较弱,主要是局地排放造成的,中午前后的最低值及下午至傍晚的峰值主要是由西南部城市地区颗粒物输送与边界层变化造成的.

(3) 在三类低能见度天气中MSE分布在 $3.8 \sim 4.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,在雾天和雾霾天MSE较高. MSE在雾天的季节变化特征最明显,其在夏季最高为 $7.7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,约为其他季节的2倍,霾天和一般天气中春季MSE低于其他季节.

(4) 上甸子地区气溶胶散射系数明显受到地面风的影响,雾霾等三类低能见度天气中盛行强西南风. 一般天气时偏西南风对气溶胶颗粒物的输送作用显著,导致方向上散射系数明显处于高位,偏东北



负值表示偏东北风 (NEE), 正值表示偏西南风 (SWW), 零值表示静风

图 5 主导风向散射系数与风速关系

Fig.5 Scattering coefficient variation with wind speed in predominant wind direction conditions

方向的风则表现为扩散稀释作用,有利于散射系数的降低。

致谢:上甸子本底站的周怀刚、董藩、王振发、周礼岩在仪器的日常维护及巡视方面做了大量工作,在此表示感谢。

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] Houghton J T, Meiro Filho L G, Callander B A, *et al.* Climate Change 1955: The Science of Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572.
- [3] Carrico C M, Rood M J, Ogren J A. Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania, during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE1) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103** (D13): 16565-16574.
- [4] Anderson T L, Masonis S J, Covert D S, *et al.* Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurements during ACE-Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (D23), 8647, doi: 10.1029/2002JD003247.
- [5] Charlson R J, Porph W M, Waggoner A P, *et al.* Background aerosol light scattering characteristics: nephelometric observations at Mauna Loa Observatory compared with results at other remote locations [J]. *Tellus*, 1974, XXVI (3): 345-359.
- [6] Delene D J, Ogren J A. Variability of aerosol optical properties at four North American surface monitoring Sites [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, **59** (6): 1135-1150.
- [7] Sisler J F, Malm W C. Interpretation of trends of $\text{PM}_{2.5}$ and reconstructed visibility from the IMPROVE network [J]. *Journal of Air & Waste Management Association*, 2000, **50** (5): 775-789.
- [8] 胡波, 张武, 张镭, 等. 兰州西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征[J]. *高原气象*, 2003, **22** (4): 354-360.
- [9] 孟昭阳, 蒋晓明, 颜鹏, 等. 太原冬季大气气溶胶的散射特征[J]. *气候变化研究进展*, 2007, **3** (5): 255-259.
- [10] 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**: 8903-8915.
- [11] 许建明, 耿福海, 甄灿明, 等. 上海浦东地区气溶胶散射系数及影响因子[J]. *环境科学学报*, 2010, **30** (1): 211-216.
- [12] 柯宗建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征[J]. *大气科学*, 2007, **31** (3): 553-559.

-
- [13] 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.
- [14] 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究[J]. *气象学报*, 2008, **66**(1): 111-119.
- [15] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(4): 468-471.
- [16] 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(6): 733-738.
- [17] Chow J C, Watson J G, Park K, *et al.* Comparison of particle light scattering and fine particulate matter mass in central California [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(4): 398-410.
- [18] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性[J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(3): 257-265.
- [19] 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.
- [20] 邱传涛, 李丁华. 平均风向的计算方法及其比较[J]. *高原气象*, 1997, **16**(1): 94-98.