

北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征

柯宗建^{1, 2, 3} 汤洁²

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 分析了北京上甸子秋冬季气溶胶散射系数的变化特征、散射系数与 PM_{2.5} 质量浓度的关系, 结合气象资料分析了风场对气溶胶散射系数变化的影响。通过研究得出, 上甸子秋冬季气溶胶散射系数平均值和标准差分别为 179.7 Mm⁻¹ 和 253.2 Mm⁻¹; 阴天条件下的散射系数明显高于晴天; 散射系数与 PM_{2.5} 质量浓度之间有良好的相关性, 其相关系数为 0.93; 此外, 由于上甸子特殊的地理位置, 风场对气溶胶散射系数的影响显著, 不同风向条件下气溶胶散射系数差别很大。

关键词 大气气溶胶 散射系数 PM_{2.5} 北京

文章编号 1006-9895 (2007) 03-0553-07

中图分类号 P422

文献标识码 A

An Observation Study of the Scattering Properties of Aerosols over Shangdianzi, Beijing

KE Zong-Jian^{1, 2, 3} and TANG Jie²

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Aerosols play a very important role in the climate system through its direct and indirect effects on the radiation forcing. The scattering coefficient of aerosols is an important optical parameter representing the scattering capability of aerosols and affecting its behavior on radiant transfer. Foreign scientists have begun observation experiments of the scattering properties of aerosols since the 1980s. However, the same experiments are late in China, which leads to extremely lack the observation data of scattering properties.

In order to understand the radiative properties of aerosols in North China, a measurement was carried out during October to December 2003, in Shangdianzi regional Global Atmosphere Watch (GAW) station, which is located in the rural area of northeast Beijing city with a distance of 110 km from the downtown. The scattering coefficient was measured by a Model 9003 nephelometer (Ecotech, Australia). The zero check was done daily by using the filtered air and the span check/calibration done biweekly by using pure F134a gas, following the recommendations of manufacture. The heated inlet was used to insure that the scattering coefficient was measured under the condition that relative humidity was lower than 60%. The 5 minute data of scattering coefficient were carefully checked and then reduced to hourly dataset. Hourly PM_{2.5} mass concentration data were obtained by using a TEOM instrument (Model 1400a, R&P USA) only in December. Additionally, hourly meteorological data were obtained by an auto-

matic weather station system at site through whole three months.

The results of measurement showed that the scattering coefficient of aerosols over Shangdianzi was very variable with the hourly maximum value up to 1800 Mm^{-1} and the hourly minimum value as low as below 10 Mm^{-1} . The averaged scattering coefficient for whole experiment period was 179.7 Mm^{-1} , with the standard deviation of 253.2 Mm^{-1} . The scattering coefficient also varied with a clear diurnal pattern, high at night and low in daytime, which showed obvious influences of local inversion at night. The mean scattering coefficient in different weather conditions showed obvious differences. The scattering coefficient in overcast days was significantly higher than that in fine days. This difference is considered as the result of combination of changes in boundary layer convection and local wind flow pattern of two kinds of weather condition. A good correlation between scattering coefficient and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration was found with high coefficient as 0.93. Because of the location of Shangdianzi relative to Beijing urban area, the scattering coefficient of aerosols increased dramatically when the wind flows were from southwest. On the other hand, low scattering coefficient values often appeared in the periods of northeast wind flow. This indicates the transportation of pollutants from mega city like Beijing has significant influences on the properties of aerosols of the regional background.

Key words atmospheric aerosols, scattering coefficient, $\text{PM}_{2.5}$, Beijing

1 引言

大气气溶胶是由大气介质与悬浮于其中的固体或液体颗粒组成的体系。虽然大气中气溶胶粒子的含量很少,但它对气候变化、云的形成、能见度的改变以及人类健康有重要影响。气溶胶粒子增加的直接效应是影响水循环和辐射平衡,这两种过程都会引起气候变化^[1]。近代一些模式研究表明,人类活动造成的气溶胶粒子增加所引起的气候致冷效应可以部分地抵销人类活动造成的温室气体增加引起的气候变暖效应^[2~4]。然而,大气气溶胶的气候效应比温室气体复杂得多,气溶胶对辐射的影响取决于其分布、自身的物理化学性质以及下垫面的光学性质,而这些因子都有极大的时间和空间变率;另一方面,由于气溶胶大范围的连续观测资料还比较缺乏,给气候效应研究带来了很大的困难,这使得大气气溶胶成为当今气候变化与预测研究中一个既重要又难以估计的不确定因子^[5]。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,气溶胶的粒径不同,其影响也有明显差异。对于某一固定质量浓度的气溶胶,散射效率最高的粒子尺度为 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ^[6]。

国外对于气溶胶散射性质的观测研究起步较早,20 世纪 80 年代,NOAA 在阿拉斯加 Barrow、夏威夷莫纳罗亚山 (Mauna Loa)、萨摩亚群岛 (Samoa) 以及南极等大气监测基准站开始气溶胶散射性质的观测研究^[7, 8]。而从 1995 年开始至今,

国际大气化学研究计划 (IGAC) 组织了多次气溶胶特性实验 (ACE),获得许多珍贵的气溶胶散射性质的资料^[9~11]。相比较而言,国内对于气溶胶散射性质的观测研究起步很晚^[12]。我们于 2003 年在北京上甸子本底站对气溶胶的散射性质进行了连续观测,在对数据进行质量控制的基础上分析了上甸子秋冬季气溶胶的散射特征。

2 试验与资料

北京上甸子大气本底监测站是我国建立的第一个区域性大气本底站,其经纬度为 ($40^{\circ}39' \text{N}$, $117^{\circ}07' \text{E}$),海拔 293 m,位于北京东北方向密云县内,距离北京市约 130 km。站点的选址符合 WMO 对本底站的要求,周围无明显污染源。作为华北地区的区域性大气本底站,该站的北侧很少有大城市和其他污染源,在西南方向分布着密云、怀柔、顺义等县城,以及本地区最大的城市——北京,在东南方向有天津、塘沽等城市和工业区。从一定程度上说,上甸子本底监测站的长期观测资料反映了京、津、唐乃至整个华北地区的大气气溶胶的状况。本研究利用澳大利亚 ECOTECH 公司生产的 M9003 浊度计进行连续观测,此仪器用来测量波长为 525 nm 的气溶胶散射系数。仪器安放在实验室内,进气管通过软管转接伸到屋顶之上,进气口为装有防虫网的 TSP 进气口,离屋顶约 1.5 米高,距离地面高度大于 5 米。仪器在使用前利用零气(用高性能颗粒物过滤器制备)与国产的 F134a (纯度

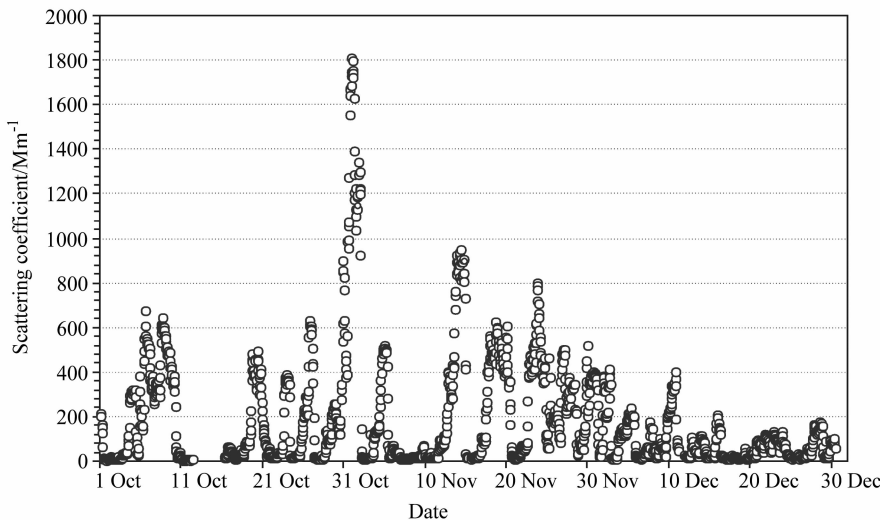


图 1 散射系数逐时变化

Fig. 1 Hourly means of the scattering coefficient

为 99.5% 以上) 进行标定, 标定值符合仪器的标准, 稳定度达 95% 以上, 这相当于仪器的零点测量精度达到 0.7 Mm^{-1} (通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)。此外, 还利用美国 TEOM 公司生产的 1400A 系列监测仪测量 PM_{2.5} 的质量浓度。由于此类仪器在国内的使用比较常见, 这里不作具体介绍。

先后获取了上甸子 2003 年 10 月 1 日至 12 月 30 日 (北京时, 下同) 期间气溶胶散射系数数据和气象资料。三个月中, 因断电以及每天仪器自动校准造成约 6 天的数据缺测, 此外, 在对数据处理过程中, 对因仪器开关机和调整过程中产生的异常数据进行甄别, 删除了约两个小时的数据。总共缺测和删除的数据不超过 7%, 气溶胶散射系数的变化基本连续, 散射系数数据比较完整。将每天获取的零气检查值作每 5 分钟一次的时间序列平均, 用于调整散射系数每 5 分钟的测量值, 再对这些处理后的数据进行小时平均。此外, 还获取了 2003 年 12 月 7~29 日 PM_{2.5} 质量浓度的观测资料, 取仪器测得的小时平均数据。

3 结果与分析

3.1 气溶胶散射系数的变化特征

图 1 反映了 2003 年 10 月 1 日至 12 月 30 日观测期间气溶胶散射系数的逐时变化, 从图中看出, 气溶胶散射系数的小时平均值在观测期间内变化非常激烈, 10 月份和 11 月份散射系数小时平均值明显比 12 月份高, 特别是 10 月底到 11 月初, 小时平

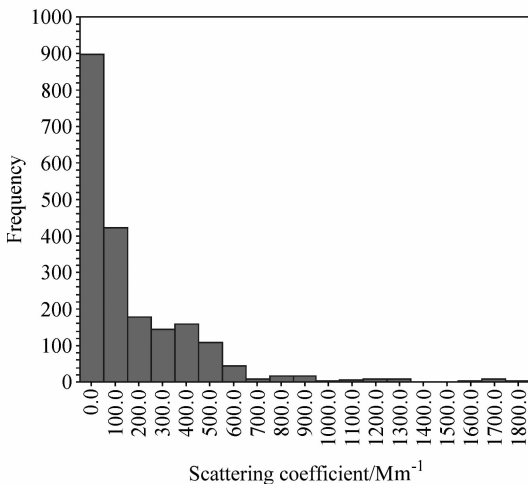


图 2 散射系数统计分布图

Fig. 2 Statistical distribution of the scattering coefficient

均值急剧增加, 最大值达到 1800 Mm^{-1} 左右, 然后回落, 其原因将在 3.2 节具体讨论。12 月份, 散射系数小时平均值明显减小, 主要在 200 Mm^{-1} 范围内变化。

图 2 为散射系数小时平均值的统计分布图, 有效样本 2038 个, 区间间隔设为 100 Mm^{-1} , 可以看出, 上甸子气溶胶散射系数小时平均值出现频率最高的区间主要是 50 Mm^{-1} 以下, 其频次将近 900, 比其他区间高出许多, 整个观测期间散射系数的平均值和标准差分别为 179.7 Mm^{-1} 和 253.2 Mm^{-1} 。

图 3 为气溶胶散射系数的日变化分布情况, 这是利用百分位数制作的 Box-plot 图。百分位数 (Percentile) 是一种常用的数值统计方法, 图 3 中

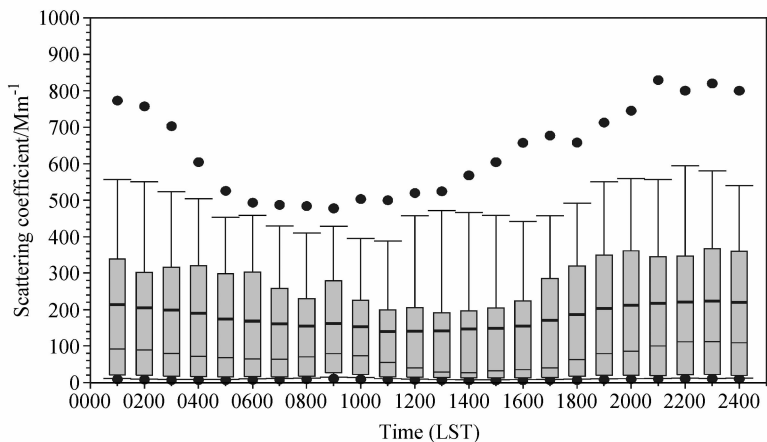


图 3 散射系数日变化分布

Fig. 3 Diurnal variation of the scattering coefficient

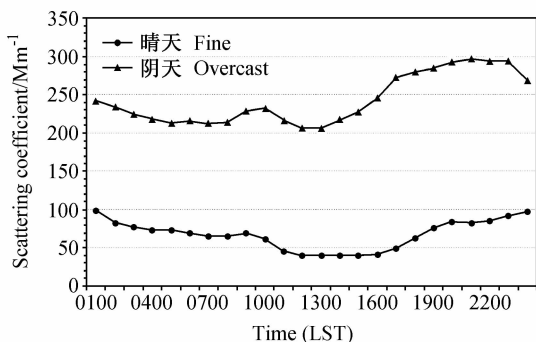


图 4 不同天气条件下散射系数日变化分布

Fig. 4 Diurnal variation of the scattering coefficient in different weather conditions

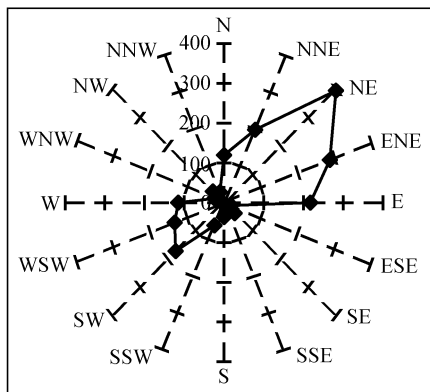


图 5 风向玫瑰图(单位: h)。静风: 301 h

Fig. 5 Wind rose (units: h). Calm: 301 h

从下到上分别表示 5 分位数、10 分位数、25 分位数、中值 (50 分位数)、平均值、75 分位数、90 分位数和 95 分位数的日变化情况。在整个观测期间气溶胶散射系数的日变化比较平缓, 平均值的日变化在 200 Mm^{-1} 左右, 夜间散射系数值高于白天, 中值明显低于平均值, 基本上维持在 100 Mm^{-1} 以下。利用气象资料首先排除有降水出现当天的散射系数数据, 然后根据每天三个时刻的总云量进行分类, 三个时刻的总云量都 ≤ 8 划分为晴天 (实际上为非阴天), 而总云量记录的三个时刻中只要有一个时刻总云量 ≥ 9 则划分为阴天。这两种不同的天气条件下, 晴天与阴天的统计样本分别为 772 与 509 个, 散射系数平均值 (标准差) 分别为 67.3 Mm^{-1} (97.5 Mm^{-1}) 与 243.3 Mm^{-1} (226.4 Mm^{-1}), 阴天散射系数平均值比晴天的三倍还高。图 4 是不同天气条件下散射系数平均值日变化分布图, 从图上看, 晴天气溶胶散射系数平均值维持在 100 Mm^{-1}

以下, 平均值日变化比较平缓, 阴天气溶胶散射系数明显高于晴天, 平均值日变化范围在 $200 \sim 300 \text{ Mm}^{-1}$ 之间, 这主要有两方面的原因, 一方面, 阴天大气层结比较稳定, 大气低层的气溶胶维持比较高的水平, 而晴天条件下, 大气对流活动较强, 近地面的气溶胶容易扩散到大气高层, 使得近地面气溶胶浓度降低, 散射系数明显小于阴天条件下; 另一方面, 秋冬季阴天条件下上旬子偏西南风的频率明显高于晴天。晴天, 西南扇区 (SW-WSW-W) 的风向频率为 13.8%, 而阴天条件下其频率为 25.4%, 这可能也是散射系数较大的原因之一, 3.2 节将作具体的分析。

3.2 地面风对散射系数的影响

图 5 是上甸子观测期间的风向玫瑰图, 从图中看出, 秋冬季, 上甸子以 NE-ENE-E 扇区为主导风, 其次是 SW-WSW-W 扇区, 风速小于 0.2 m/s 时看作静风。图 6 是上甸子气溶胶散射系数随风向

变化图, C 表示静风, 从图上看, SW-WSW-W 扇区气溶胶散射系数的平均值和中值都明显比 NE-ENE-E 扇区的大, 平均值在 300 Mm^{-1} 左右; NE-ENE-E 扇区气溶胶散射系数的平均值在 120 Mm^{-1} 左右。秋冬季, 上甸子静风出现的频率很高, 静风时气溶胶散射系数也位于较高水平。从上甸子主导风向下气溶胶散射系数与风向、风速的关系图(图 7)看, 在偏西南风方向上, 上甸子气溶胶散射系数维持在较高的水平上, 其值基本上比静风时的散射系数高; 在偏东北风方向上, 当风速大于 2 m/s , 散射系数平均值随风速增加迅速减小, 这体现了大气输送过程对上甸子气溶胶的影响。上甸子偏西南

方向上有较多的污染源, 风速加大增加扩散的同时也通过大气输送把污染源的气溶胶带到上甸子, 这使得上甸子气溶胶散射系数在偏西南风时维持较高水平; 而在上甸子偏东北方向, 污染源少, 随着风速增加, 扩散作用增强, 上甸子局地的气溶胶浓度由于扩散作用大大降低, 表现出散射系数随风速增加迅速降低的趋势。

从 10 月 30 日到 11 月 2 日这段时间里, 散射系数小时平均值从 100 多 Mm^{-1} 上升到 1800 Mm^{-1} , 极大值出现在 11 月 1 日的凌晨, 是一次强污染过程。从气象风场资料看, 这段时间内主要以偏西南风为主, 散射系数上升的时刻对应着西南

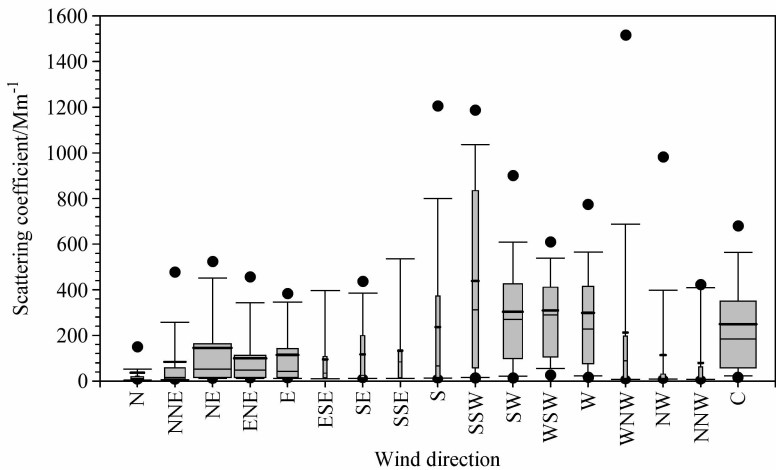


图 6 散射系数随风向变化图
Fig. 6 Scattering coefficient variation with wind direction

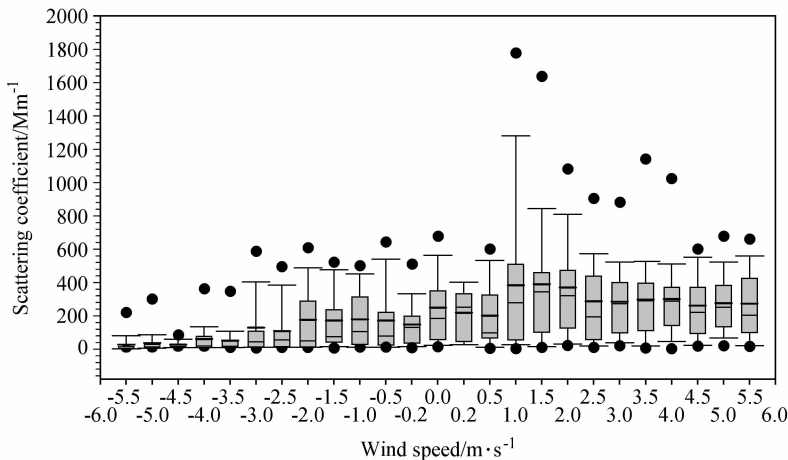


图 7 主导风向下散射系数与风向、风速关系图。负值表示偏东北风 (NE-ENE-E), 正值表示偏西南风 (SW-WSW-W), 零值表示静风 (风速小于或等于 0.2 m/s)
Fig. 7 Scattering coefficient variation with wind speed in predominant wind direction conditions. Negative values represent northeast wind (NE-ENE-E), positive ones represent southwest wind (SW-WSW-W). Naught represents calm (wind speed within 0.2 m/s)

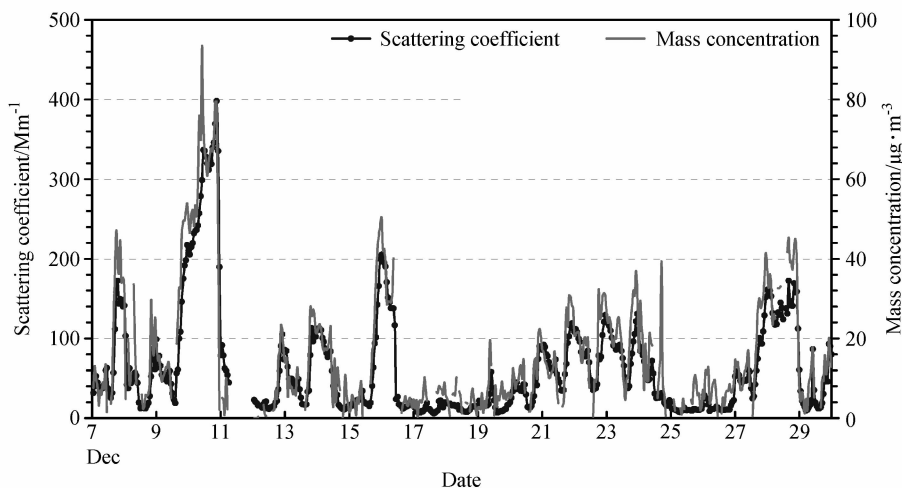


图 8 2003 年 12 月 7~29 日散射系数与 PM2.5 质量浓度逐时分布

Fig. 8 Hourly means of the scattering coefficient and PM2.5 mass concentration during 7–29 Dec 2003

风,且风速在 3 m/s 以上,偏西南风把上甸子西南方向的污染源带到上甸子,气溶胶散射系数迅速增大。11 月 2 日没有出现降水天气,散射系数迅速回落主要是由于风向转变导致的。11 月 2 日凌晨风向开始转为北风,并在接下来的一天多时间里,维持偏北的风向。偏北风把上甸子北面的干净大气输送到上甸子,这直接引起上甸子地区气溶胶颗粒迅速减少,气溶胶散射系数随之迅速降低。此过程很直观地反映了大气输送对上甸子气溶胶散射系数的影响。

3.3 散射系数与 PM2.5 质量浓度的关系

通常认为气溶胶的质量浓度与散射系数之间存在着一定的相关性,一般气溶胶质量浓度大,其散射系数相应较大。对于单位质量浓度的气溶胶,细粒子的散射作用明显大于粗粒子^[13]。图 8 是气溶胶散射系数与 PM2.5 质量浓度的逐时分布图,从图中看出,气溶胶散射系数与 PM2.5 质量浓度小时平均值的变化趋势非常相似,基本上表现出同位相变化,质量浓度出现高值时散射系数也相应较大,而质量浓度的低值也对应着较小的散射系数,表现出很好的一致性。

对散射系数与 PM2.5 质量浓度的小时平均数据作统计,有效样品 457 个,其相关系数为 0.93,通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。图 9 是气溶胶散射系数与 PM2.5 质量浓度散点图。气溶胶散射系数与质量浓度的比值反映单位质量浓度气溶胶的散射作用,称为质量散射系数 (mass scattering efficiency),其表达式为: $\alpha=\delta_{sp}/M$, 其中, M 为气溶胶的

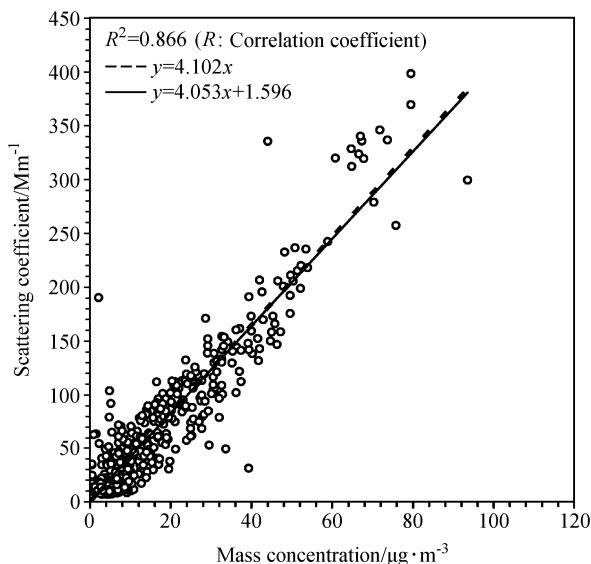


图 9 散射系数与 PM2.5 质量浓度散点图

Fig. 9 Scattergram of the scattering coefficient and PM2.5 mass concentration

质量浓度。质量散射系数与气溶胶的粒径有直接关系,细粒子对散射系数贡献很大而对质量浓度贡献较小,其质量散射系数一般较大,此外,质量散射系数也与气溶胶的化学成分有关,由硫酸盐与硝酸盐组成的气溶胶,散射作用比较显著,质量散射系数一般较大。Bergin 等^[13]在北京市区通过观测估算 PM2.5 的质量散射系数为 $2.6 \text{ m}^2/\text{g}$, Xu 等^[14]在临安本底站测得 PM2.5 的质量散射系数为 $4.0 \text{ m}^2/\text{g}$ 。本文在上甸子观测了 TSP 的散射系数和 PM2.5 的质量浓度,两者的气溶胶粒径范围并不一致,但

是, 细粒子对散射系数的贡献远大于粗粒子, 而图9也很好反映出所测得的TSP散射系数与PM_{2.5}的相关关系, 说明上甸子PM_{2.5}对总散射系数的贡献是稳定的, 也是主要的, 因此, 本文也估算上甸子TSP散射系数与PM_{2.5}质量浓度的比值为4.1 m²/g, 提供一个比较参考。White等^[15]估算了美国西南部 Spirit Mountain, NV (35.25°N, 114.73°W) 和 Meadview, AZ (36.02°N, 114.07°W) 两个站点粗粒子 (>2.5 μm) 对总散射系数的贡献分别为26%与32%, Chow等^[16]基于有效的方差权重系数估算了PM_{2.5}与粗粒子 (>2.5 μm) 对总散射系数的贡献约分别为70%与30%。如果根据Chow等^[16]估算的比例进行计算, 可以估算出上甸子PM_{2.5}的质量散射系数约为2.9 m²/g。当然, 气溶胶的物理、化学性质随时间与空间的变率很大, 因此, 这个估值也有待于观测数据的进一步验证。

4 结论

(1) 秋冬季, 上甸子气溶胶散射系数逐时变化非常激烈, 其日变化相对比较平缓, 夜间散射系数高于白天。秋冬季散射系数平均值和标准差分别为179.7 Mm⁻¹和253.2 Mm⁻¹, 阴天条件下散射系数明显高于晴天。

(2) 散射系数与PM_{2.5}质量浓度的逐时变化表现出比较一致的趋势, 它们之间存在较好的相关性, 其相关系数为0.93。

(3) 地面风对散射系数影响显著。上甸子由于地理位置比较特殊, 不同风向条件下散射系数差别很大, 偏西南方向的风对上甸子散射系数的增加有很大的贡献, 而偏东北方向的风有利于散射系数的减小。

致谢 北京市气象局上甸子大气本底观测站提供了气象观测数据, 其所有工作人员对本论文的观测工作提供了各种帮助和支持, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

[1] 刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展. 气候与环境研究, 1999, **4** (4): 406~414
Liu Y, Wang M X, Zhang R J. The present status of aerosol research in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1994, **4** (4): 406~414

[2] Charlson R J, Langner J, Rodhe H. Sulphate aerosol and climate. *Nature*, 1990, **348**: 22; doi:10.1038/348022a0

[3] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forc-

ing by anthropogenic aerosols. *Science*, 1992, **255**: 423~430

[4] Schult I, Feichter J, Cooke W F. Effect of black carbon and sulfate aerosols on the global radiation budget. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 30107~30118

[5] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. 大气科学, 1998, **22** (4): 418~427
Zhou X J, Li W L, Luo Y F. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (4): 418~427

[6] Quinn P K, Coffman D J, Kapustin V N, et al. Aerosol optical properties in the marine boundary layer during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE-1) and the underlying chemical and physical aerosol properties. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 16547~16563

[7] Bodhaine B A. Aerosol measurements at four background sites. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**: 10753~10768

[8] Bodhaine B A. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100** (D5): 8967~8975

[9] 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. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D13): 16565~16574

[10] Quinn P K, Bates T S, Coffman D J, et al. A comparison of aerosol chemical and optical properties from the 1st and 2nd Aerosol Characterization Experiments. *Tellus*, 2000, **52B**: 239~257

[11] 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. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D23): ACE15-1~ACE15-19

[12] 柯宗建, 汤洁, 王炳忠, 等. 积分浊度计在沙尘暴监测网试验中应用分析. 气象科技, 2004, **32** (4): 258~262
Ke Z J, Tang J, Wang B Z, et al. Primary analysis of application results of integrating nephelometers in dust storm monitoring network experiment. *Meteorological Science and Technology*, 2004, **32** (4): 258~262

[13] Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D16): 17969~17980

[14] Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**: 161~173

[15] White W H, Macias E S, Nininger R C, et al. Size-resolved measurements of light scattering by ambient particles in the Southwestern U. S. A. *Atmos. Environ.*, 1994, **28**: 909~922

[16] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. Comparability between PM_{2.5} and particle light scattering measurements. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, **79**: 29~45