

陈宇, 银燕, 钱凌, 等. 2009. 南京北郊 2007 年 10~12 月大气气溶胶吸收和散射特性的观测 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 613-620.
Chen Yu, Yin Yan, Qian Ling, et al. 2009. Observation of the absorption and scattering coefficients of atmospheric aerosols in the north suburb of Nanjing from October to December 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 613-620.

南京北郊 2007 年 10~12 月大气气溶胶 吸收和散射特性的观测

陈宇 银燕 钱凌 王巍巍 严家德 陈晨

南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 南京 210044

摘要 通过对南京北郊 2007 年 10~12 月大气气溶胶吸收和散射系数的连续观测, 分析了该地区大气气溶胶吸收和散射特性在不同天气状况下的演变规律。结果发现: 霾日状况下大气气溶胶吸收和散射系数日变化剧烈, 非霾日次之, 雾日变化较稳定; 在 00 时 (北京时间, 下同) 至 08 时霾日气溶胶吸收和散射系数与雾日相差不大, 而在 08 时至 24 时则雾日明显大于霾日; 非霾日气溶胶吸收和散射系数最小; 降水使得大气气溶胶吸收和散射系数明显降低。

关键词 气溶胶 光声黑碳仪 吸收系数 散射系数 霾 雾

文章编号 1006-9585 (2009) 06-0613-08 **中图分类号** P41 **文献标识码** A

Observation of the Absorption and Scattering Coefficients of Atmospheric Aerosols in the North Suburb of Nanjing from October to December 2007

CHEN Yu, YIN Yan, QIAN Ling, WANG Weiwei, YAN Jiade, and CHEN Chen

Key Laboratory of Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the observation of absorption coefficients and scattering coefficients of the atmospheric aerosols during October to December in 2007 in the north suburb of Nanjing, the characteristics of absorption and scattering coefficients under different meteorological conditions are analyzed. The results indicate that the diurnal variations of the absorption and scattering coefficients of atmospheric aerosols are the most significant in hazy days, followed by that in non-hazy days, and the least pronounced in fog days. It is also found that the difference in absorption coefficient and scattering coefficient between hazy days and fog days is not significant from 0000 LST to 0800 LST, but the reverse is true for the measurements from 0800 LST to 2400 LST (both the parameters are larger in fog days than in hazy days), and that the absorption and scattering coefficients are the smallest in non-hazy days. The results also show that both the absorption and scattering coefficients are remarkably reduced due to precipitation.

Key words aerosol, photoacoustic soot spectrometer, absorption coefficient, scattering coefficient, haze, fog

收稿日期 2008-09-25 收到, 2009-10-13 收到修定稿

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2006CB403706 和江苏省自然科学基金资助项目 BK2006226

作者简介 陈宇, 男, 1981 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气气溶胶方面的研究。E-mail: cy_02063@163.com

1 引言

大气气溶胶粒子通常是指悬浮于大气中的微小粒子, 粒径在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间, 它们不仅可以降低大气能见度, 影响大气环境, 还能直接影响人和其他动植物的生理健康。Ramanathan et al. (2001) 的研究表明, 粒径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子, 表面富集了空气中大量有毒有害物质, 可直接进入呼吸系统和血液循环, 导致心血管和呼吸道疾病的增加。此外, 大气气溶胶还通过改变地气系统辐射平衡和云的微物理结构对气候产生影响。

气溶胶辐射强迫的大小与气溶胶含量的时空分布及其本身的光学性质有关, 而气溶胶光学性质又取决于气溶胶粒子的尺度、谱分布、化学组成以及环境相对湿度等。国内外学者针对大气气溶胶光学特性已开展了一系列观测研究。如 Dubovik et al. (2000, 2002)、Kim et al. (2004) 通过大规模太阳光度计网络化观测, 研究了大气气溶胶的各种光学特性参数及变化特征。此外, 积分浊度计、黑碳仪以及光声仪器也用来直接测量气溶胶的吸收和散射系数 (Moosmüller et al., 1998; Arnott et al., 2003; Mallet et al., 2005; Petzold et al., 2005)。研究结果表明, 散射系数的增加与新颗粒物的形成有关, 特别是二次污染物的生成。国内学者于 20 世纪 80 年代初期开始大气气溶胶光学特性的观测研究, 采取的主要方法有多波段太阳光度计观测法、宽带消光法、天空亮度法等 (毛节泰等, 1983; 李放等, 1996; 周秀骥等, 1998), 同时也利用黑碳仪、积分浊度计等进行气溶胶观测研究。汤洁等 (1999) 在四川温江、北京上甸子、浙江临安和西藏拉萨等地利用黑碳仪进行了黑碳气溶胶的观测。黄世鸿等 (2000) 利用粒子采样法对中国 23 个地区边界层气溶胶的吸收系数进行了测量, 发现中国地区边界层气溶胶的吸收系数在 $1 \sim 1000 \text{ Mm}^{-1}$ 之间, 明显呈现北高南低的趋势, 四川盆地和贵州有一相对较高的中心; 吸收系数与粒子含量之间的相关系数为 0.74, 吸收系数与粒子含量的分布一致性较好, 小颗粒的吸收性能好于大颗粒。胡波等 (2003) 利用 2002 年 1 月 31 日~2 月 2 日的积分

浊度仪观测资料和可吸入颗粒物 (PM₁₀) 观测资料对冬季兰州市西固区大气气溶胶粒子散射特征及其与空气污染的关系进行了研究。结果表明, 波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ (绿光) 处散射系数日变化规律呈双峰型, 峰值分别出现在 11~12 时 (北京时间, 下同) 和 22 时左右, 散射系数的变化范围是 $1.34 \times 10^{-4} \sim 3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, 变化规律同 PM₁₀ 浓度的变化规律是一致的, 两者有较好的相关性, 相关系数 $r \geq 0.8$ 。李杨等 (2005) 利用黑碳仪获得了西安站点 2003 年 9~11 月大气细粒子中每 5 分钟的黑碳气溶胶 (BC) 浓度, 这些实时的 BC 浓度经过元素碳校对后, 日平均浓度为 $10.2 \pm 5.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 变化范围为 $1.8 \sim 27.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; BC 浓度与污染指数 (API) 的变化具有良好的一致性 ($r = 0.64$)。黄辉军等 (2006) 利用 Anderson 采样器在夏、冬两季, 分别在南京市 4 个站点进行了为期 7 天的气溶胶 PM_{2.5} (直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的大气气溶胶) 采样, 结果表明, 南京市 PM_{2.5} 浓度的夏、冬平均值分别为 69.1 和 $139.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{2.5}/PM₁₀ 的全年平均值为 63.9%。范焯等 (2007) 对 2004 年 8、9 月间机载 PMS 系统在北京及周边地区进行的不同天气状况下的 8 次气溶胶飞行观测资料进行了分析, 结果表明, 此观测期间, 近地层以轻雾、霾为主; 风速较小的晴天和阴天都有可能使气溶胶浓度出现高值; 逆温层底有气溶胶粒子的明显累积。

大气气溶胶的吸收散射系数不仅与颗粒物的浓度、化学成分有关, 还受环境相对湿度等的影响。相对湿度对气溶胶光学特性的影响主要是由水汽对气溶胶粒子的折射指数和谱分布的影响造成的, 这一影响在太阳辐射能量集中的可见光波段尤为显著。气溶胶粒子群体的主要积分光学特性参数, 基本上随相对湿度的增大而增大 (杨军等, 1999)。

除了卫星和地面观测, 模式模拟也在大气气溶胶研究中有了广泛应用。Ma et al. (2003) 利用气溶胶热平衡模式研究了瓦里关硝酸盐的气-粒平衡状态和气-粒转化过程, 模拟表明: 冬季瓦里关硝酸盐主要 (90%) 是以颗粒物形态存在, 细粒子中的硝酸盐气溶胶不低于粗粒子中硝酸盐气溶胶的含量, 这一结果与海洋上空的观测分析结果不同; 在瓦里关, 硝酸盐细粒子主要是通过气态

硝酸与氨气反应生成, 硝酸盐粗粒子主要是通过硝酸蒸汽在矿物气溶胶表面凝结形成。Liu et al. (2005) 利用多尺度空气质量模式 (CMAQ) 研究了华北地区二次气溶胶的形成和氨气排放的影响, 模拟结果与观测对比表明 CMAQ 能够较好地模拟华北地区污染物 (NO_x 、 CO 、 O_3 、 NH_3 、 HNO_3 、 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等) 的变化。张美根等 (2005) 利用一个三维化学输送模式系统模拟研究了东亚地区春季 BC 的输送和演变过程, BC 浓度的模拟值与地面观测站和观测船获取的监测值具有良好的—致性; 模式系统较好地反映了 BC 浓度的时空分布和变化趋势。

本文利用从美国 DMT (Droplet Measuring Technologies) 公司引进的光声黑碳仪 PASS1 (PhotoAcoustic Soot Spectrometer) 对南京北郊大气气溶胶的吸收和散射系数进行了连续观测, 以期了解气溶胶吸收和散射系数在霾、雾、降水等不同天气状况下的变化特征以及与气象条件的关系。

2 仪器及资料处理方法

观测仪器为美国 DMT 公司生产的 PASS1, 该仪器可以同时测量气溶胶的吸收系数 B_{abs} 和散射系数 B_{scat} 。它采用的激光波长为 781 nm。仪器测量原理是: 用泵以 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率将气体抽进共鸣器 (resonator), 在此过程中采样气流未被干燥, 气流中的气溶胶粒子通过吸收激光光能对气体产生周期性的加热, 其温度变化约 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, 而不会改变气溶胶 (包括含水粒子) 的性质和在空气中的分布状态, 从而不影响测得的气溶胶的吸收和散射系数, 加热的气体膨胀产生声压力波, 安装在共鸣器一端的麦克风测得声波声压 P_{mic} 。其中激光的功率 P_{laser} 由积分球探测器进行测量。由测得的声压以及激光的功率通过公式

$$B_{\text{abs}} = \frac{P_{\text{mic}}}{P_{\text{laser}}} \frac{A_{\text{res}}}{\gamma - 1} \frac{\pi^2 f_0}{Q} \quad (1)$$

就可以得到吸收系数 B_{abs} 的值, 其中 A_{res} 、 f_0 和 Q 分别是共鸣器的横截面积、频率和质量因子, γ 是加热时空气的等容比。散射系数 B_{scat} 是通过光倍增管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) 的散射探头测量的。

秋、冬季是南京地区霾、雾发生的主要季节。

本文取 2007 年 10 月 1 日~12 月 31 日的观测资料为分析对象。观测点位于南京西北郊, 设在南京信息工程大学气象楼, 距地面高度约 30 m。仪器每一秒对观测数据进行一次纪录, 本文给出的是每两分钟一次的平均吸收系数 b_{abs} 和平均散射系数 b_{scat} 。观测过程中, 每天 3 次 (08 时、12 时和 21 时) 监控仪器的运行状况并做温、压、湿、风等气象要素的记录, 遇到雾日、霾日时加密记录。观测前以及观测开始后两个月按照仪器要求对其进行二次校正。

3 结果与讨论

3.1 霾日和非霾日气溶胶吸收和散射系数的日变化特征比较

定义大气能见度小于 10.0 km, 相对湿度小于 90.0%, 并排除降水等其他能导致低能见度事件的情况为霾日; 当能见度小于 10.0 km, 相对湿度大于 90.0%, 并排除降水等其他能导致低能见度事件的情况定义为雾日。根据该定义, 本文把整个观测时段 (除降水时外) 分为非霾日 (9 天, 观测期间相对湿度为 13.4%~77.8%, 能见度为 10.5~35.0 km)、霾日 (10 天, 观测期间相对湿度为 27.0%~88.0%, 能见度为 1.5~8.3 km) 和雾日 (8 天, 观测期间相对湿度为 91.0%~99.9%, 能见度为 0.1~1.8 km; 其中 4 个雾过程全天有雾, 其他 3 个雾过程仅对有雾时段数据进行了统计), 并将观测数据分别处理得到南京 10~12 月不同天气状况下气溶胶吸收和散射系数的日平均变化情况。

从图 1a 中可看出, 霾日吸收和散射系数都是夜间高而白天低, 吸收系数在 08 时左右达到最大 (38.5 Mm^{-1}), 最小值 (9.3 Mm^{-1}) 出现在 14 时左右; 而散射系数的最大值 (107.3 Mm^{-1}) 出现在凌晨 04 时左右, 最低值 (36.6 Mm^{-1}) 出现在 12~14 时之间。这表明, 12~14 时, 强烈的太阳辐射加热地表大气使得边界层湍流扩散能力增强, 大气中的污染物随大气湍流扩散稀释, 同时太阳辐射加热大气使得气溶胶粒子表面的水汽蒸发, 减小气溶胶粒子的半径, 因此, 该时段大气气溶胶的吸收和散射系数明显降低。而 14~18 时太阳辐射减弱, 边界层厚度减小, 大气中气溶胶

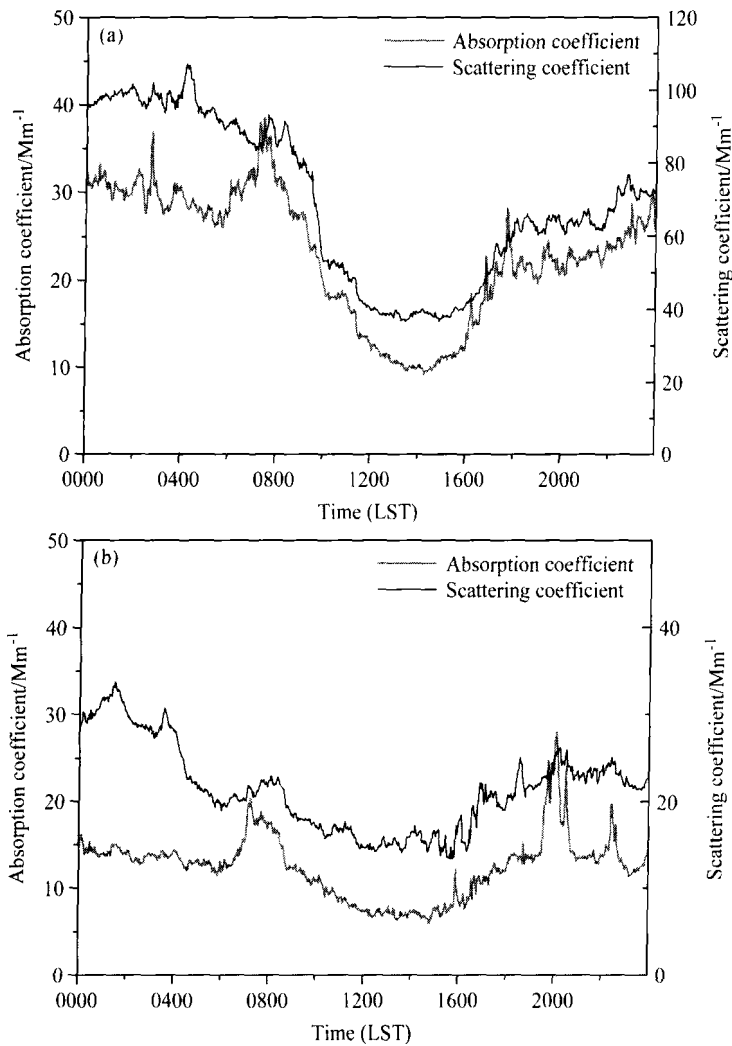


图1 (a) 霾日和 (b) 非霾日吸收系数和散射系数的日变化

Fig. 1 Diurnal variations of absorption coefficient and scattering coefficient in (a) hazy days and (b) non-hazy days

累积导致吸收和散射系数的回升。而在 18 时至次日 08 时尽管人类活动相对减弱, 气溶胶排放量减少, 但大气层结稳定, 湍流扩散能力弱, 所以大气气溶胶的吸收和散射系数一直保持在较高值。同时也可看出, 散射系数一般是吸收系数的 2~3 倍, 说明这一地区的大气颗粒污染物中以散射性气溶胶成分 (如硫酸盐、硝酸盐、有机碳等) 为主。童尧青等 (2007) 分别分析了南京市区和郊区两个站点气溶胶粒子的化学成分, 发现硫酸盐成分的含量最大, 达到颗粒物总质量的 25%, 其他如硝酸盐、有机碳、氯离子等也占有重要位置。统计得到散射系数与相对湿度存在很好的正相关性, 相关系数在 0.56~0.99 之间, 这是因为散射性气溶胶的成分大部分具有亲水性。因此, 相对湿度的增加有利于散射系数的增加。观测表明,

相对湿度与吸收系数的相关性不大。

与霾日相似, 非霾日 (图 1b) 的吸收和散射系数也呈现白天低、夜间高变化趋势。吸收系数在 08 时和 20 时分别达到 20 Mm^{-1} 和 28 Mm^{-1} 的峰值, 而谷值只有 5.9 Mm^{-1} 。散射系数的最大值为 33.7 Mm^{-1} , 最小值为 13.3 Mm^{-1} , 低于霾日的 107.3 Mm^{-1} 和 36.6 Mm^{-1} 。这是由于非霾日大气较清洁, 导致吸收和散射系数均较低。在 00~07 时, 人类活动较少, 气溶胶浓度变化不大, 吸收系数保持平稳, 07 时以后人类活动增加, 使得黑碳等污染物排放增多, 吸收系数上升; 但日出后太阳辐射加热地面导致湍流增强, 气溶胶数浓度下降, 至 15 时出现谷值, 之后随着大气湍流减弱, 吸收系数开始回升; 统计得到散射系数与相对湿度相关系数在 0.59~0.95 之间, 因此非霾日散射系

数主要随着相对湿度的变化而变化; 气溶胶数浓度以及化学成分等其他因素处于次要地位。

3.2 雾日气溶胶吸收和散射系数的日变化特征

本文统计的 8 个雾日来自 7 次雾过程。由图 2 看出, 散射和吸收系数在雾日都没有明显变化, 尽管 11~14 时太阳辐射强造成雾的厚度变薄, 相对湿度减小, 但两系数只有微小的下降, 整体幅度均不超过 10 Mm^{-1} , 这是由于雾日时大气为稳定层结, 静风, 这种稳定的层结不利于污染物扩散, 且 90% 以上的相对湿度更有利于气溶胶粒子的形成, 使得气溶胶浓度进一步增加, 24 h 平均

散射系数为 92.8 Mm^{-1} , 吸收系数为 27.5 Mm^{-1} , 远高于霾日和非霾日。

12 月 19 日 01 时 30 分至 15 时为一个典型的雾先减弱后增强最后消散的过程, 并在 04 时 30 分至 08 时雾明显减弱。由图 3 可知, 在 04 时 30 分以前, 吸收和散射系数始终处于小幅震荡, 基本趋势并无明显变化, 04 时 30 分至 08 时雾明显减弱, 湍流增强, 相对湿度减小, 气溶胶被稀释, 因此其吸收和散射系数迅速下降; 08 时之后, 雾再次变浓, 散射吸收系数出现回升; 10 时 30 分雾开始消散, 由于湍流活动增强, 大气稳定层结遭

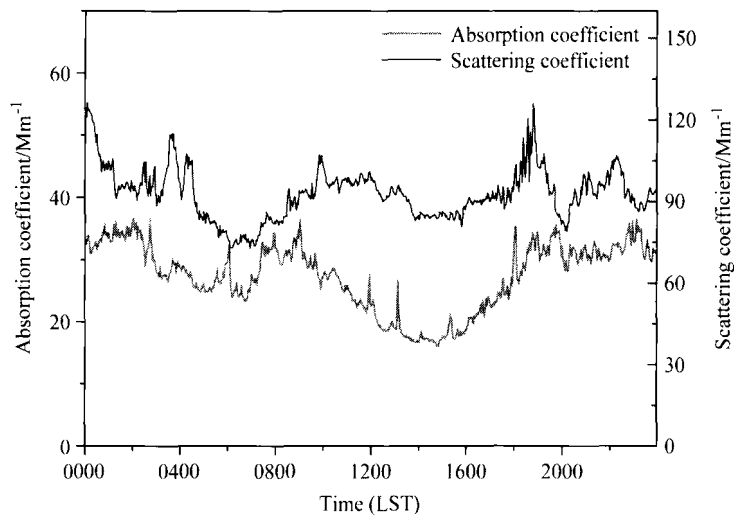


图 2 雾日气溶胶吸收系数和散射系数的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of absorption coefficient and scattering coefficient in fog days

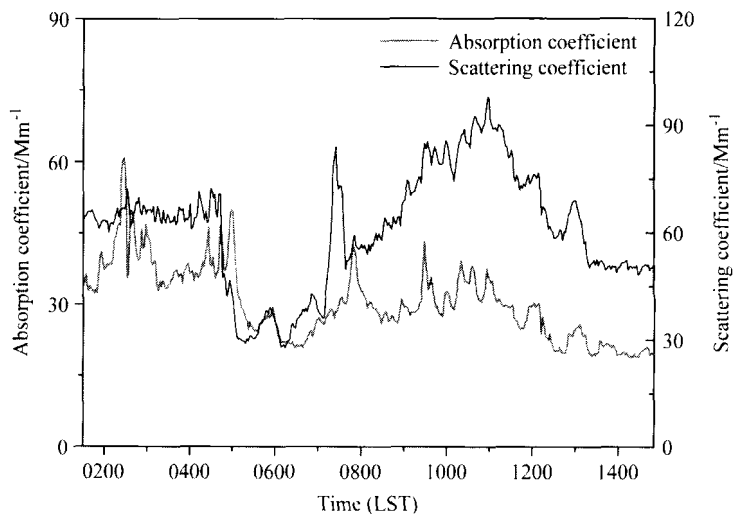


图 3 2007 年 12 月 19 日雾过程中吸收系数和散射系数变化

Fig. 3 The variations of absorption coefficient and scattering coefficient on 19 Dec 2007

到破坏,气溶胶随湍流而稀释;又因为相对湿度的减小,附着在气溶胶粒子表层的水分蒸发,其半径减小,促使该时段气溶胶的吸收和散射系数降低。吸收和散射系数随着雾的强弱而变化,同时影响它们大小的另一重要因素是气溶胶的化学成分,散射性气溶胶在雾日(相对湿度90%以上)影响更加明显,散射系数是吸收系数的2~4倍。

3.3 霾日、非霾日、雾日吸收和散射系数的日变化比较

由图4a可以看出气溶胶的吸收系数在总体趋势上是一致的,在00时至08时霾日气溶胶吸收系数与

雾日相差不大,而在08时至24时则雾日明显大于霾日;24h平均吸收系数是雾日(27.5 Mm^{-1})大于霾日(22.9 Mm^{-1})大于非霾日(12.4 Mm^{-1})。这是由于雾日层结稳定,静风,气溶胶不断累积;而霾日的稳定层结在中午太阳辐射强烈时遭到破坏,同时根据观测,中午风速增大,将气溶胶输送到其他地区,导致吸收系数下降明显;非霾日大气稳定度低,湍流活动活跃,因此其值最小。

不同天气状况下的散射系数变化趋势呈现不同特点(图4b)。在雾日和非霾日,散射系数除小幅波动外并无大的变化,而霾日在08时至18

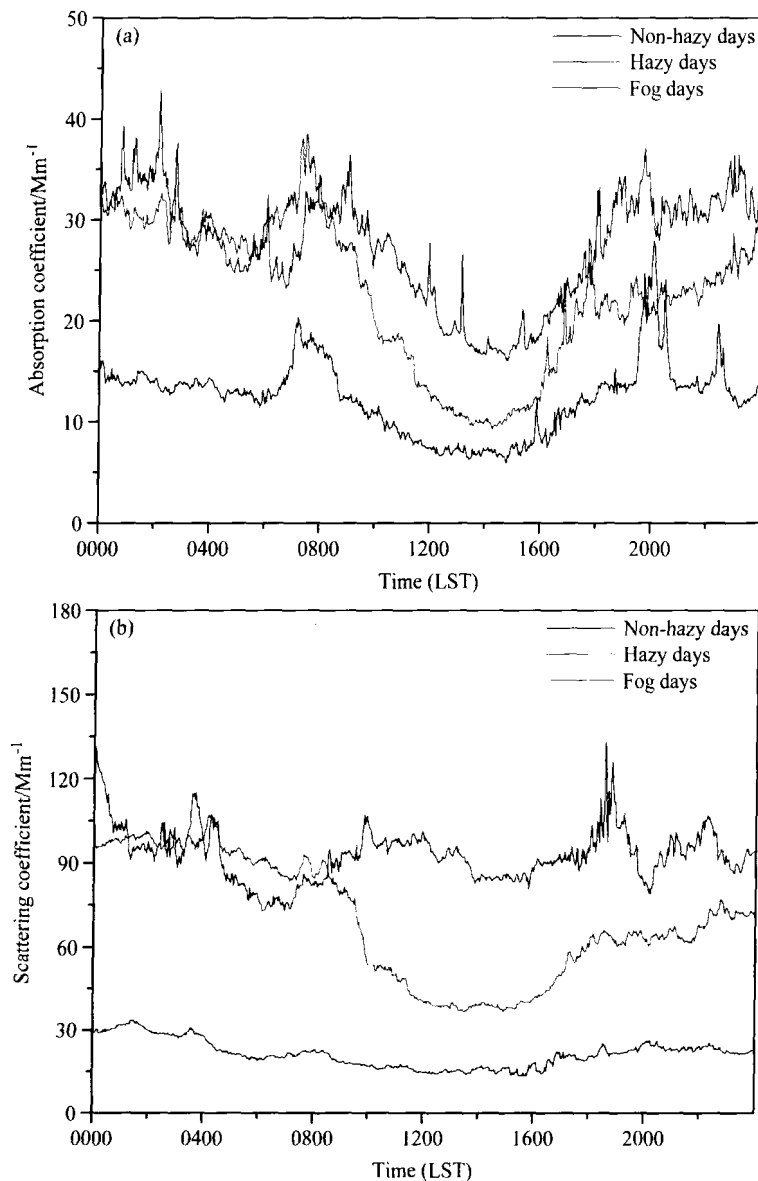


图4 (a) 吸收系数和 (b) 散射系数在霾日、非霾日、雾日时的日变化比较

Fig. 4 Comparison of diurnal variations of (a) absorption coefficients and (b) scattering coefficients in hazy days, non-hazy days, and fog days

时出现明显的低谷, 这是由于雾日处于稳定层结, 气溶胶不易扩散; 而非霾日的湍流作用明显, 气溶胶不停地被扩散输送; 因此两者的趋势保持一致, 并没有太大的波动。在雾日和霾日, 00 时至 08 时两者气溶胶吸收和散射系数相差不大, 而在 08 时至 24 时则雾日明显大于霾日; 这是由于太阳辐射主导着大气稳定性, 在 08 时之后, 太阳辐射不容易穿透雾而加热地面、增强大气对流, 而霾日时则可以穿透大气加热地面、增强对流, 进而向上输送气溶胶, 使得底层气溶胶被稀释。而从 24 h 平均散射系数来看, 雾日 (92.8 Mm^{-1}) 大于霾日 (69.4 Mm^{-1}) 大于非霾日 (21.4 Mm^{-1}), 这与吸收系数的结果是一致的。由 3.1 节已知霾日的散射系数是吸收系数的 3 倍, 而雾日的 24 h 平均散射系数是吸收系数的 3.4 倍, 这更进一步说明, 南京气溶胶污染成分中以散射性气溶胶为主。田文寿等 (1993) 利用一次外场试验中两个不同高度上的太阳辐射观测资料, 计算了城市烟雾层大气平均光学特性参数, 得到兰州冬季城市烟雾层大气的平均吸收系数为 158 Mm^{-1} , 散射系数为 410 Mm^{-1} 。由此可看出兰州污染重于南京, 吸收和散射系数均较大, 且散射系数大于吸收系数这一定性结论是一致的。

3.4 降水对气溶胶吸收和散射系数的影响

从 2007 年 10 月 24 日 21 时 30 分降水开始, 25 日凌晨结束, 而且这两天为静风。为了描述降水前后气溶胶的吸收和散射系数的变化, 取降水前 (24 日 02 时 30 分至 21 时 30 分) 和降水后 (25 日 10 时 30 分至 11 时 30 分) 各 1 h 内的吸收

和散射系数作平均。由图 5 看出吸收系数由降水前的 37.5 Mm^{-1} 变为降水后的 7.6 Mm^{-1} , 散射系数由降水前的 191.2 Mm^{-1} 变为降水后的 47.2 Mm^{-1} , 由此可见降水对气溶胶粒子有非常显著的湿清除作用, 使得大气气溶胶吸收和散射系数迅速降低。这与钱凌等 (2008) 得到的降水对直径在 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$ 的细颗粒物的去除作用明显的结论一致。

4 结论

通过对南京北郊 2007 年 10~12 月大气气溶胶吸收和散射系数的连续观测, 并对数据进行了分析, 初步结论如下:

(1) 南京市北郊冬季霾日大气气溶胶吸收和散射系数白天低、夜间高, 变化剧烈, 非霾日次之, 雾日变化较为稳定, 这主要是受大气湍流扩散规律控制, 同时受不同天气状况时大气污染程度影响。

(2) 大气气溶胶平均吸收系数雾日 (27.5 Mm^{-1}) 大于霾日 (22.9 Mm^{-1}) 大于非霾日 (12.4 Mm^{-1}); 平均散射系数有相似规律, 雾日 (92.8 Mm^{-1}) 大于霾日 (69.4 Mm^{-1}) 大于非霾日 (21.4 Mm^{-1}); 大气气溶胶以散射性成分为主, 散射系数是吸收系数的 2~3 倍。

(3) 大气气溶胶吸收和散射系数的上升和下降与雾的生消基本同步。

(4) 降水对气溶胶的显著清除作用使得大气气溶胶吸收和散射系数明显降低, 吸收和散射系数分别由降水前的 37.5 Mm^{-1} 和 191.2 Mm^{-1} 变为降水后的 7.6 Mm^{-1} 和 47.2 Mm^{-1} 。

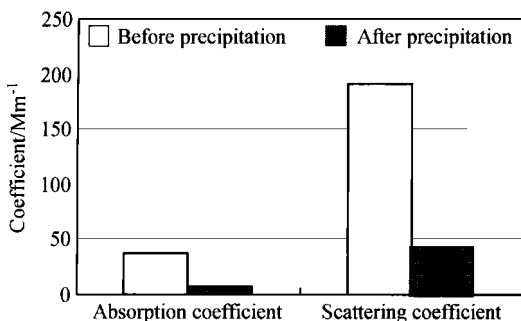


图 5 2007 年 10 月 24~25 日降水过程前后气溶胶吸收和散射系数的变化

Fig. 5 The variations of absorption and scattering coefficients of aerosols before and after precipitation

参考文献 (References)

- Arnott W P, Moosmüller H, Sheridan P J, et al. 2003. Photoacoustic and filter-based ambient aerosol light absorption measurements: Instrument comparisons and the role of relative humidity [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1): 4034, doi: 10.1029/2002JD002165.
- Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. 2000. Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 9791-9806.
- Dubovik O, Holben B N, Eck T F, et al. 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in

- world wide locations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59: 590-608.
- 范焯, 郭学良, 付丹红, 等. 2007. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (1): 49-62. Fan Ye, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2007. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (1): 49-62.
- 胡波, 张武, 张镭, 等. 2003. 兰州市西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征 [J]. *高原气象*, 22 (4): 354-360. Hu Bo, Zhang Wu, Zhang Lei, et al. 2003. A study on scattering properties of aerosol particle over Xigu district of Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22 (4): 354-360.
- 黄辉军, 刘红年, 蒋维楣, 等. 2006. 南京市 PM_{2.5} 物理化学特性及来源解析 [J]. *气候与环境研究*, 11 (6): 713-722. Huang Huijun, Liu Hongnian, Jiang Weimei, et al. 2006. Physical and chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (6): 713-722.
- 黄世鸿, 李子华, 杨军. 2000. 中国地区边界层大气气溶胶辐射吸收特性 [J]. *高原气象*, 19 (4): 487-494. Huang Shihong, Li Zihua, Yang Jun. 2000. Light-absorbing properties of aerosols in the atmospheric boundary layer over China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (4): 487-494.
- Kim D H, Sohn B J, Nakajima T, et al. 2004. Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D02209, doi: 10.1029/2003JD003387.
- 李放, 吕达仁. 1996. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征 [J]. *大气科学*, 20 (4): 385-394. Li Fang, Lü Daren. 1996. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing Area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (4): 385-394.
- 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2005. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析 [J]. *气候与环境研究*, 10 (2): 229-237. Li Yang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, et al. 2005. The variability and source apportionment of black carbon aerosol in Xi'an atmosphere during the autumn of 2003 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (2): 229-237.
- Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji. 2005. Simulation of secondary aerosols over North China in summer [J]. *Science in China (Ser. D)*, 35 (Suppl. II): 156-166.
- Ma Jianzhong, Jie Tang, Li Shaomeng, et al. 2003. Size distributions of ionic aerosols measured at Waliguan Observatory: Implication for nitrate gas-to-particle transfer processes in the free troposphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D17): 4541, doi: 10.1029/2002JD003356.
- 毛节泰, 王强, 赵柏林. 1983. 大气透明度光谱和浑浊度的观测 [J]. *气象学报*, 41 (3): 322-331. Mao Jietai, Wang Qiang, Zhao Bolin. 1983. The observation of the atmospheric transparency spectrum and the turbidity [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 41 (3): 322-331.
- Mallet M, Dingenen R V, Roger J C, et al. 2005. In situ airborne measurements of aerosol optical properties during photochemical pollution events [J]. *J. Geophys. Res.*, 69: 73-97.
- Moosmüller H, Arnott W P, Rogers C F, et al. 1998. Photoacoustic and filter measurements related to aerosol light absorption during the Northern Front Range Air Quality Study (Colorado 1996/1997) [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (28): 149-157.
- Petzold A, Schloesser H, Sheridan P, et al. 2005. Evaluation of multi-angle absorption photometry for measuring aerosol light absorption [J]. *Aerosol Science and Technology*, 39: 40-51.
- 钱凌, 银燕, 童尧青, 等. 2008. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 28 (1): 18-22. Qian Ling, Yin Yan, Tong Yaoqing, et al. 2008. Characteristics of size distributions of atmospheric fine particles in the north suburban area of Nanjing [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 28 (1): 18-22.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosol climate and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294: 2119-2124.
- 汤洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 1999. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. *应用气象学报*, 10 (2): 160-169. Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi, et al. 1999. Observational study of black carbon in clean air area of western China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 10 (2): 160-169.
- 田文寿, 张镭, 陈长和. 1993. 城市烟雾层大气光学特性的研究 [J]. *兰州大学学报*, 35 (1): 225-230. Tian Wenshou, Zhang Lei, Chen Changhe. 1993. Study on optical properties of urban smog layer [J]. *Journal of Lanzhou University (in Chinese)*, 35 (1): 225-230.
- 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 2007. 南京地区霾天气特征分析 [J]. *中国环境科学*, 27 (5): 584-588. Tong Yaoqing, Yin Yan, Qian Ling, et al. 2007. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 27 (5): 584-588.
- 杨军, 李子华, 黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响 [J]. *大气科学*, 3 (2): 239-247. Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. 1999. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 3 (2): 239-247.
- 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. Zhang Meigen, Xu Yongfu, Zhang Renjian, et al. 2005. Emission and concentration distribution of black carbon aerosol in East Asia during springtime [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 48 (1): 46-51.
- 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 1998. 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 [J]. *大气科学*, 22 (4): 418-427. Zhou Xiuji, Li Weiliang, Luo Yunfeng. 1998. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 418-427.