

大气气溶胶消光系数测量新方法

宫纯文^{1,2,3} 李学彬^{1*} 李建玉¹ 曹亚楠^{1,2} 朱文越¹ 徐青山¹ 魏合理¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 海军蚌埠士官学校信息技术系, 安徽 蚌埠 233012)

摘要 利用光在镀膜玻璃管中传输的特点, 介绍了一种测量大气气溶胶消光系数的新方法。该方法将某一波长的光以一定角度入射到充满气溶胶的玻璃管中, 经管壁的多次折返大大增加了光程, 气溶胶对光的衰减信息可以通过玻璃管两端的探测器测量得到, 利用比值计算方法消除光电转换过程中因光强波动、管壁不均匀以及分子散射等带来的测量误差, 提高了气溶胶消光系数测量的灵敏度。将用该方法测量气溶胶在波长 550 nm 上的消光系数, 与能见度仪测量结果对比表明此方法测量结果是合理的, 且该方法具有原理简单、操作方便等特点。

关键词 大气光学; 气溶胶; 消光系数; 镀膜玻璃管

中图分类号 P412.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0101001

New Method of Aerosol Extinction Coefficient Measurement

Gong Chunwen^{1,2,3} Li Xuebin¹ Li Jianyu¹ Cao Yanan^{1,2}

Zhu Wenyue¹ Xu Qingshan¹ Wei Heli¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Department of Information and Technology, Bengbu Navy Petty Officer Academic, Anhui, Bengbu 233012, China

Abstract A new method is proposed for measurement of aerosol extinction coefficient by taking advantage of the characteristic of light transmission through coated glass tubes. When a ray of light of a particular wavelength penetrates through a glass tube filled with aerosols at a certain angle, the optical path length will be greatly increased due to multiple reflection of the light on the tube wall, and the amount of light diminished by aerosols can be measured by the sensors at both ends of the glass tube. The ratio calculation method is used to remove the effect of measurement errors caused by the light intensity fluctuation, uneven tube wall, molecular scattering, etc. during the photoelectric conversion. The sensitivity for measuring the extinction coefficients of aerosols is raised. Finally, this method is used to measure the extinction coefficients of aerosols in the wavelength of 550 nm. Compared with the results obtained with a visibility meter, the results obtained with this method are reasonable. In addition, based on simple principles, this method can be easily applied.

Key words atmosphere optics; aerosol; extinction coefficient; coated glass tube

OCIS codes 010.1290; 010.1110; 290.2200; 230.7370

1 引言

气溶胶是大气物理化学过程中的一个重要因

素, 大气科学的很多领域都与气溶胶有关。大气气溶胶对气候变化有重要的直接和间接的影响, 通过

收稿日期: 2013-07-01; **收到修改稿日期**: 2013-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41105021)

作者简介: 宫纯文(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事大气气溶胶光学探测方面的研究。

E-mail: cwgong@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事红外辐射大气传输和卷云红外辐射特性方面的研究。

E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: xbLi@aiofm.ac.cn

气溶胶粒子吸收和散射太阳辐射,直接改变地-气系统的能量收支,气溶胶粒子作为云的凝结核(CCN)改变云的光学特性和生命周期而间接地影响气候^[1-8]。颗粒物污染造成低能见度,细粒子进入肺部损害健康,气溶胶微物理参数的测量是认识其污染变化特点以至制定治理措施的基础,气溶胶的消光系数是了解其光学特性的重要参数。目前,关于气溶胶对光衰减的测量已有很多报道^[9-16],测量气溶胶消光系数的方法大体上可以分为如下几种:1)前向探测法,一端主动发射激光光源,在一定距离上的另一端接收透射光,透射光和入射光的比值就是透射率进而转化为消光系数;2)后向散射探测法,激光雷达等属于后向散射探测法,测量气溶胶的后向散射信息反演得到消光系数;3)侧向探测法,能见度仪就是利用侧向探测法,测量气溶胶的侧向(约33°)散射信息反演得到消光系数;4)反射法,通过某一物体对自然光的反射以及周边物体的对比度也可以反演消光系数。以上这些方法有一定的局限性,例如:前向探测方法需要一定的测量距离(光程),而后向和侧向以及反射法都是反演法,不是直接测量。因此研究简单易行的气溶胶消光系数测量方法是很有意义的。

为了克服上述方法的局限性,本文提出利用镀膜玻璃管测量大气气溶胶消光系数的方法,其采用直接前向测量的方法,在长度为1 m的玻璃管内可以实现几十米的光传输,达到长程传输的目的,真实反映了光在大气中传输以及与气溶胶的相互作用。使用半导体激光器作为入射光光源,波长可选532、

635、650、660、808、980 nm,也可以是连续激光光源,这些优势将极大地拓展了对气溶胶的消光特性研究。

2 测量系统

气溶胶消光系数测量系统由发射光单元、镀膜玻璃管、两个光电探测单元以及控制和信号处理单元组成。采用内外表面镀高反射率膜的玻璃管作为光传输管,设玻璃管的内径为 d ,玻璃管的长度为 L ,光束入射角为 θ ,则光束折返次数 N 为

$$N = \frac{L}{\tan \theta \cdot d}, \quad (1)$$

光每两次反射之间在玻璃管内的行程 P 为

$$P = \tan \theta \cdot d, \quad (2)$$

光束在气溶胶中的总传输距离 D 为

$$D = \frac{L}{\sin \theta}. \quad (3)$$

(3)式可以看到,传输距离与玻璃管内径大小无关,只与玻璃管长度和入射角有关。如果选 1° 的光入射角,将使光在气溶胶介质中传输距离放大57.3倍,极大地提高了气溶胶消光系数测量的灵敏度。当然,最小入射角还与探测器灵敏度、光束入射孔径和玻璃管内壁的反射率大小等因素有关。本装置玻璃管的长度取860 mm,直径取50 mm,入射光角度取 1° ,光传输近50 m。采用信号比较的方式避开玻璃管管壁和大气分子对信号的影响。

图1为气溶胶消光系数测量样机设计示意图,系统测量流程为:在玻璃管的进气口安装上过滤器,

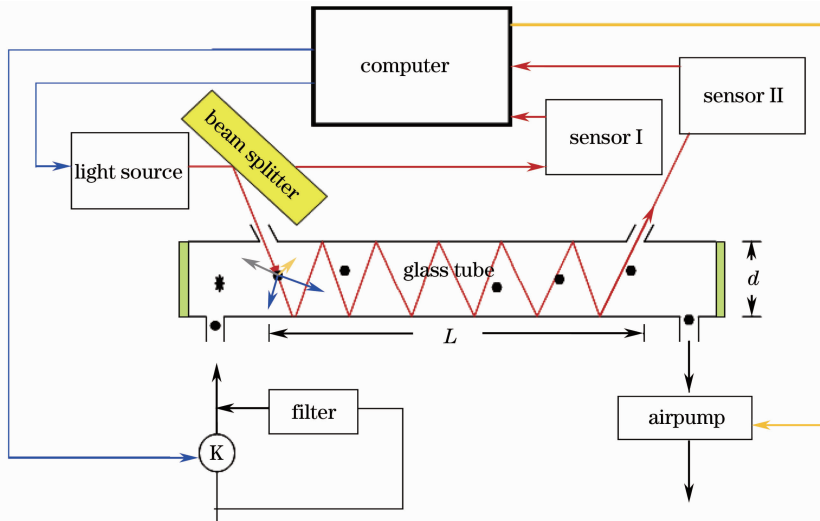


图1 气溶胶消光系数测量样机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prototype model for measurement of aerosol extinction coefficient

假设入射光光强为 I_1 ，让信号光以某一角度通过没有气溶胶的干净大气传输，测量玻璃管和分子的衰减，衰减信息为 I_2 ，然后取下过滤器，用真空泵进行抽气使气溶胶粒子在玻璃管内均匀流动，测量信号光的衰减信息为 I_3 ，由于玻璃管的高反射率，光的损耗主要由气溶胶的衰减造成的，玻璃管的反射衰减和分子衰减 $I_1 - I_2$ 可以在测量干净空气时得到并在测量气溶胶时扣除，此时气溶胶的衰减信息可表示为

$$E = (I_2 - I_3) / I_1. \quad (4)$$

此方案利用玻璃管高反射率使激光在管壁间来回反射，在有限的空间上实现了长光程传播，有效扣除了管壁和空气分子的光散射干扰，在测量中没有改变了气溶胶粒子的自然悬浮状态，也考虑了粒子的多次散射效应和后向散射以及一些界面反射等的影响。镀膜玻璃管测量气溶胶散射系数，使用方便，测量迅速，有效扣除管壁和空气分子的光散射干扰，可以实现实时测量。

3 数值模拟

由上面的方案可以看到，光的传输距离与波导管内径大小无关，只与波导管长度和入射角有关。这里波导管长为 860 cm，入射角为 1° ，光在气溶胶中传输约 49.3 m，假设波导管壁的反射率为 100%，入射光光强为 1，气溶胶消光系数由 0.1 km^{-1} 变化到 10 km^{-1} ，光的衰减由下式给出：

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-k_{\text{ext}} \cdot D), \quad (5)$$

式中 I_0 为入射光的强度， I 为经过气溶胶衰减后光的强度， k_{ext} 为消光系数， D 为光的传播光程。测量衰减端光的强度变化如图 2 所示。可以看出：随着消光系数的增大，衰减端光的强度变小。

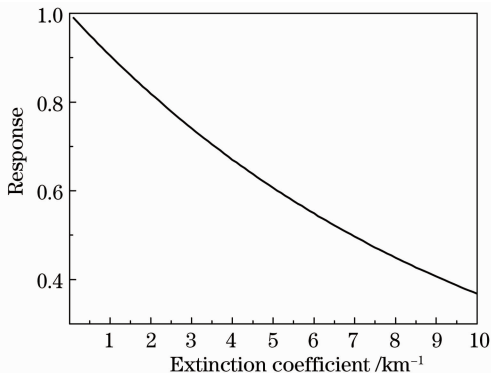


图 2 衰减端光的强度随消光系数的变化关系

Fig. 2 Diminished light intensity versus extinction coefficient

图 2 是气溶胶消光系数和衰减端光电探测器测量电压的对应关系，在实际应用时需要对该曲线进行标定，标定流程为：在波导管的进气口安装上过滤器，让信号光以某一角度通过没有气溶胶的干净大气传输，测量经过波导管和分子衰减光的电压值为 V_0 ，然后取下过滤器，用真空泵进行抽气使气溶胶粒子在玻璃管内均匀流动，测量信号光的衰减信息 V_1 ，由于波导管的高反射率，光的损耗主要由气溶胶的消光造成，此时气溶胶的消光信息可表示为 $V = V_0 - V_1$ ，如果此时使用激光雷达或者能见度仪测量大气气溶胶消光系数为 s_0 ，对应图 2 中 I_0 对应的响应量为 R_0 ，则使用该装置测量实际大气气溶胶时，衰减端所测电压值 V_i 对应的消光系数可表示为

$$s_i = s_0 - \ln[(V_0 - V_1) / V] / D, \quad (6)$$

式中 V_0 和 V_1 中均包含管壁和大气分子散射的干扰， $V_0 - V_1$ 有效扣除了此干扰，采用电压大小相比较 $(V_0 - V_1) / V$ 的方法则有效避免了入射光的不稳定引起的散射光信号变化。

4 实验验证

2012 年 12 月 10 日和 28 日在中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心五楼实验室，分别使用大气气溶胶消光系数测量样机和能见度仪 (FD12 U21208) 对大气气溶胶进行对比测量，首先使用能见度仪对消光系数测量样机进行标定，再对大气气溶胶进行测量，测量结果如图 3 和图 4 所示。

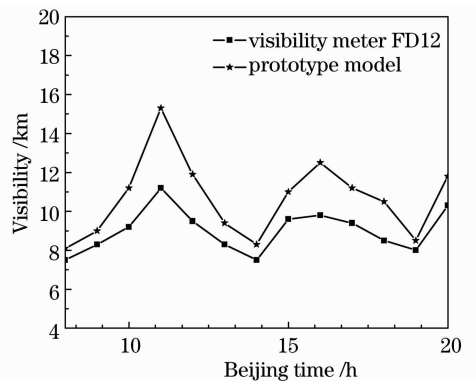


图 3 实验样机与能见度仪测量结果对比

Fig. 3 Results of prototype model versus the results of visibility meter

由图 3 可以看出，样机测量结果和能见度仪测量结果变化趋势基本一致，但在能见度比较大时偏差加大，在能见度与标定能见度相近时偏差较小。实验中发现长时间测量易引起气溶胶粒子依附在玻璃管管壁，引起反射率降低，经过改进，采用洁净的

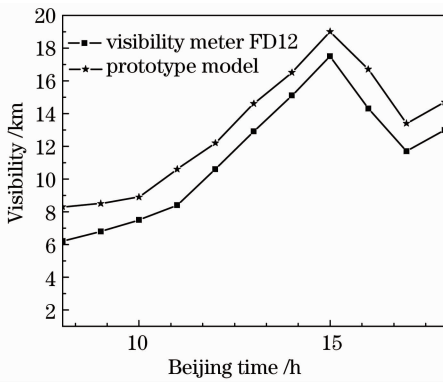


图 4 改进后实验样机与能见度仪测量结果对比

Fig. 4 Results of improved prototype model versus the results of visibility meter

高压氮气对玻璃管进行定时清洗(测量一次,清洗一次)。图 4 是改进后样机测量结果和能见度仪测量结果的对比,可以看出两者测量结果变化比较一致,说明清洗减少了粒子对管壁的污染。两次对比结果表明实验样机测量结果总体偏大,究其原因可能是粒子的多次散射光耦合到前向散射光中使其增强引起的。但总体看来两种方法测量结果变化趋势一致,说明此方法测量结果是合理的,但还有待于改进。

5 结 论

大气气溶胶消光系数是气溶胶基本物理参数之一,对气溶胶消光系数测量是一件非常重要的工作。利用光在镀膜玻璃管中传输光程长、损耗低等特点,本文介绍了一种测量大气气溶胶消光系数的新方法,将某一波长的光在充满气溶胶的玻璃管中以一定角度经多次折返在管壁间长距离传输,气溶胶对光的衰减信息可以通过玻璃管两端的探测器测量得到,利用比值计算方法消除光电转换过程中因光强波动、管壁不均匀以及分子散射等带来的测量误差,提高了测量气溶胶消光系数的灵敏度。该方法使用方便、测量迅速、结果合理,在测量过程中不改变粒子的悬浮状态,可以实现实时测量和自动监控,且该方法具有原理简单、操作方便等特点,是一种很有使用前景的测量方法。

参 考 文 献

- 1 K N Liou. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective [J]. *Monthly Weather Review*, 1986, 114(6): 1167–1199.
- 2 Q Fu, P Yang, W B Sun, *et al.*. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models [J]. *J Climate*, 1998, 11(9): 2223–2237.

- 3 Q Fu, W B Sun, P Yang. Modeling of scattering and absorption by nonspherical cirrus ice particles at thermal infrared wavelength [J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(16): 2937–2947.
- 4 P Yang, K N Liou, K Wyser, *et al.*. Parameterization of scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(D4): 4699–4718.
- 5 Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.*. Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060101.
曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060101.
- 6 Zhou Xiuji, Li Weiliang, Luo Yunfeng, *et al.*. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(4): 418–427.
周秀骥, 李维亮, 罗云峰, 等. 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*, 1998, 22(4): 418–427.
- 7 Mao Jietai, Li Chengcai. Observation study of aerosol radiative properties over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 622–635.
毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 622–635.
- 8 Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.*. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826–840.
石广玉, 王 标, 张 华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826–840.
- 9 C I Lin, M Baker, R J Charlson. Absorption coefficient of atmospheric aerosol: a method for measurement [J]. *Appl Opt*, 1973, 12(6): 1356–1363.
- 10 G T Wolff, C M Stroup, D P Stroup. The coefficient of haze as a measure of particulate elemental carbon [J]. *J Air Pollu Control Associ*, 1983, 33(8): 764–751.
- 11 K M Adams. Real-time *in situ* measurements of atmospheric optical absorption in the visible via photoacoustic spectroscopy. 1: evaluation of photoacoustic cells [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(19): 4052–4056.
- 12 T Hayasaka, Y Meguro, Y Sasano, T Takamura. Optical properties and size distribution of aerosols derived from simultaneous measurements with lidar, a sunphotometer, and an aureolemeter [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(9): 1630–1635.
- 13 Tan Kun, Hu Huanling. Correction of measured results of an optical particle counter [J]. *Acta Optica Sinia*, 1984, 4(1): 55–60.
谭 锟, 胡欢陵. 光学粒子计数器测量结果的订正 [J]. *光学学报*, 1984, 4(1): 55–60.
- 14 Yan Fengqi, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurement of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinia*, 2003, 23(7): 855–859.
阎逢旗, 胡欢陵, 周 军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射指数虚部的测量 [J]. *光学学报*, 2003, 23(7): 855–859.
- 15 Wei Xiaodong, Zhang Hua. Analysis of optical properties of nonspherical dust aerosols [J]. *Acta Optica Sinia*, 2011, 31(5): 0501002.
卫晓东, 张 华. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0501002.
- 16 Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli, *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinia*, 2008, 28(9): 1655–1658.
李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究 [J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1655–1658.