

# 基于散射法原理的能见度及气溶胶消光特性测量分析

韩永<sup>1,2</sup>, 饶瑞中<sup>2</sup>, 王英俭<sup>2</sup>

(1. 南京大学 大气科学系, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 气溶胶是指悬浮在大气中的各种半径为 0.01~20  $\mu\text{m}$  的固体和液体粒子, 它们对光的影响表现为散射和吸收, 是致使大气中光波传输时能量损失的原因之一。介绍了两种测量大气气溶胶光散射特性的仪器, 前向散射能见度仪和三波长积分浊度计, 通过在合肥地区系统的测量, 获得了该地区大气能见度和气溶胶消光的统计特征, 为有关光学工程试验提供了科学依据。对比分析了两种设备测量结果, 为提高探测精度, 将两种仪器的测量结果放在一起进行了研究, 获得了满足特殊试验要求的第一手数据, 夏秋两季的能见度较高时, 平均能见度的最大值超过 10 000 m。实验结果对于大气环境评价和辐射气候效应及有关光学试验有重要的参考价值。

**关键词:** 大气光学; 气溶胶光学特性; 能见度仪; 积分浊度计

**中图分类号:** P427 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)04-0663-04

## Measurement and analysis of atmospheric visibility and aerosol extinction characteristics based on scattering statistical

HAN Yong<sup>1,2</sup>, RAO Rui-zhong<sup>2</sup>, Wang Ying-jian<sup>2</sup>

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Aerosol are many solid and liquid particles with the radii from 0.01 to 20  $\mu\text{m}$  suspending in atmosphere. They will scatter and absorb the light which is one of reasons of light energy losing in atmosphere. It is necessary to study the aerosol extinction characteristics. Two instruments for measure of atmospheric aerosol extinction coefficients characteristics were introduced, one is forward scatter visibility sensor, and the other is three-wavelength integrating nephelometer. The contrast and analysis results of the two instruments were given and combined to increase the precision of detection. Then atmospheric visibility and aerosol extinction characteristics were obtained through the system measurement. The maximum value of the visibility was exceed 10 000 m and it was very high in summer and autumn in Hefei area. And the differences of visibility value in night were not obvious in the different seasons. The experimental results will be of great reference value to studying the atmospheric environmental assessment, aerosol radiation-climate effect and related optical experiment.

**Key words:** Atmospheric optics; Aerosol optical characteristics; Visibility sensor; Integrating nephelometer

收稿日期: 2007-10-15; 修订日期: 2007-11-10

基金项目: 国家 863 计划(激光和航天领域某专题); 南京大学人才引进启动基金(020722410111); 国家 863 计划(大气光学重点实验室科学基金)(2008-01)

作者简介: 韩永(1975-6), 男, 安徽怀远人, 讲师, 博士, 主要研究方向为大气探测和遥感、气溶胶云和辐射的相互作用、目标环境特性。  
Email: HanYong@nju.edu.cn

导师简介: 饶瑞中(1963-), 男, 安徽阜阳人, 研究员, 博士生导师, 博士, 从事大气光学、激光大气传输前沿物理问题、光辐射和图像的大气传播、大气湍流的光学特征及其光学测量方法研究工作。Email: rao@aiofm.ac.cn

王英俭(1963-), 男, 安徽岳西人, 研究员, 博士生导师, 博士, 从事大气光学、光波和图像大气传输及自适应光学相位校正研究工作。Email: wyj@aiofm.ac.cn

## 0 引言

能见度是气象观测的常规项目,反映大气的浑浊程度,是表征近地表大气污染程度的一个重要物理量,对航空、航海、陆上交通、目标探测和识别以及军事活动都有重要的影响<sup>[1-3]</sup>。在气象学中,能见度是识别气团特性的重要参数之一,代表当时的大气光学状态,预示着天气的变化,在天气预报和环境监测上都有实际意义。气溶胶消光特性是获取能见度的关键参数,也是研究大气物理光学、辐射气候效应的主要因子之一。因此,获取大气能见度和气溶胶消光特性的长期变化特征和趋势就成为人们研究的重点。选择合适时段进行光学工程试验来分析大气环境状况非常重要<sup>[4-5]</sup>。此外,大气气溶胶的消光特性还影响图像在大气中的传输效果<sup>[6-7]</sup>。

目前,已有很多方法用于大气能见度和气溶胶探测<sup>[8-17]</sup>。我国气象站大部分仍采用人工目测方法来观测能见度,这样主观因素较多,误差较大,特别是夜间能见度的目测结果误差更大,不能满足实际应用的需要。有些气象站用的是中心波长为红外波段的前向散射能见度仪,需要从红外向可见光波段换算,这就增加了一个误差源<sup>[17]</sup>。文中使用的仪器直接利用可见光为探测光源,进一步减少了测量误差,有利于提高测量的精度。把能见度仪和积分浊度计两者的探测结果结合起来进行统计分析,使探测结果更精确。获得典型内陆地区(如合肥)的大气气溶胶光学特性具有重要意义。

## 1 大气能见度和消光

大气粒子导致能见度减小,若等距离上目标的对比度等于人眼的对比度阈值,则目标刚刚可视,此时的距离就是能见距离<sup>[18]</sup>。世界气象组织将气象光学程程(MOR)定义为白炽灯发出色温为 2 700 K 的平行光束光通量变为其初始值的 0.05 时所通过的大气路径长度。因此,仪器探测能见度的核心问题是准确获取大气的消光系数。需指出的是,对于人眼观察白光的情况,在计算对比度时需要乘以视觉函数,它表征的是客观辐射通量和人眼主观感受间的关系<sup>[9]</sup>。

## 2 大气气溶胶光散射测量设备

### 2.1 前向散射能见度仪

前向散射能见度仪由发射器、接收器、电源/控制器和机架等部分组成,采用可见光源的前向散射体制、交叉光路结构,发射器和接收器之间的距离为

1 200 mm,主散射角 33°,发射器通过可见发光管,产生中心波长为 550 nm 的可见光入射到大气中,接收器将约 0.02 m<sup>3</sup> 的大气前向散射光汇集到光电传感器的接收面上,并将其转换为与大气能见度成反比关系的电信号。此信号经处理后送至控制器的数据采集板,经 CPU 取样和计算得到大气能见度的值,并通过 RS-232 长线驱动器送至计算机进行显示和输出<sup>[2]</sup>。

### 2.2 积分浊度计

测量气溶胶总散射系数的实验设备是美国 TSI-3563 积分浊度计(图 1),它是一种能够探测气溶胶粒子散射特性的高精度仪器<sup>[5]</sup>。其工作原理是:在采样

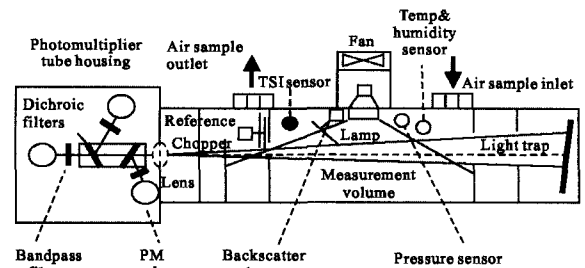


图 1 TSI-3563 积分浊度计结构示意图

Fig.1 Configuration sketch map of TSI-3563 integrating nephelometer

泵的驱动下,被光源照射到的采样气体通过进气管进入测量腔,在测量腔内,气体中的粒子对入射光产生散射。测量室内设有数个光阑,用于保证一次散射光到达光电倍增管,而多次散射光无法到达。光电倍增管产生的电信号正比于采样气体的散射系数,扣除检测腔内壁的散射、气体分子的散射和探测器内部的电子噪声,再用过滤的空气对仪器进行校准,部分去除空气中的瑞利散射。浊度计是一种光子计数仪器,使用高灵敏度的光电倍增管检测气溶胶粒子和气体分子散射的光子数。这些光子数可转化为计数频率,利用标定常数还可建立与光散射系数的关系。仪器的标定由清洁大气、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和二氟二氯甲烷(CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)来完成。测量分为两种:空气分子的瑞利散射+仪器内壁和环境气溶胶+空气分子的瑞利散射+仪器内壁。在缺少机械压力的情况下,仪器内壁的散射值在仪器工作的范围气压和温度内为常数。仪器会实时减去空气分子的瑞利散射和内壁的散射,保证其可以长时间测量环境气溶胶的散射特性。

## 3 比较分析

### 3.1 前向散射能见度仪和浊度计测量结果比较

图 2 给出前向散射能见度仪和浊度计测量消光

系数结果比较,可以看出两者吻合较好,相关系数为0.803。

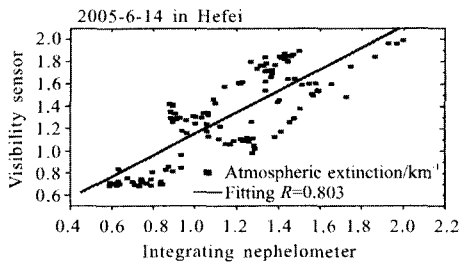


图2 积分浊度计和前向散射能见度仪的探测消光系数比较  
Fig.2 Detected extinction coefficients compare of integrating nephelometer and forward scattering visibility sensor

### 3.2 两种仪器的测量精度和影响因素

可见光波段的前向散射能见度仪工作时的环境温度 $-40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $5\%\sim 100\%\text{RH}$ ,最大风速 $17\text{ m/s}$ ,能见度测量范围 $15\text{ m}\sim 59.6\text{ km}$ ,安装时尽量远离高大建筑物和无线电发射装置,避免在阴雨天气下工作。误差的主要来源:(1)根据误差传递理论分两种情况,能见度为 $15\text{ m}\sim 10\text{ km}$ ,探测精度为 $\pm 10\%$ ,由此产生的气溶胶消光特性的计算结果误差约为 $\pm 9.1\%$ ;能见度为 $10\sim 50\text{ km}$ ,探测精度为 $\pm 20\%$ ,气溶胶消光特性计算误差约为 $\pm 16.7\%$ 。(2)假设气溶胶粒子是球形的,可使用经典的球形粒子的Mie散射理论,而实际大气中的气溶胶粒子很多形状都不规则,由于推导非球形粒子的电磁波的严格解比较困难,目前还没有比较完善的理论研究。

浊度计工作的最高海拔为 $2\text{ km}$ ,环境温度为 $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $0\sim 90\%$ ,污染等级II。气溶胶散射系数 $30\text{ s}$ 内平均的灵敏度:蓝、绿波长为 $1.0\times 10^{-4}\text{ km}^{-1}$ ,红光波长为 $3.0\times 10^{-4}\text{ km}^{-1}$ 。对于密度均匀半径为 $0.05\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子输运效率大于 $95\%$ 。

### 4 合肥地区气溶胶消光系数和能见度年变化特征

实验数据采样点为2005年四季中每月10天(晴天)的观测数据,前向散射能见度仪采样率 $1\text{次/s}$ 。首先对其结果进行 $10\text{ min}$ 平均,然后按照每月数据对应的时间点作小时平均即可得到每月的能见度随时间的变化。积分浊度计每分钟采样一次,也是进行 $10\text{ min}$ 平均,同能见度仪的数据处理方法相同,为提高测量精度,结合两者的结果( $0.55\text{ }\mu\text{m}$ )进行统计平均。

图3给出了四季变化特征 $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶消光系数统计结果。可以看出:一天中,中午消光系数小,早晚消光系数大;冬春两季的凌晨气溶胶消光系数

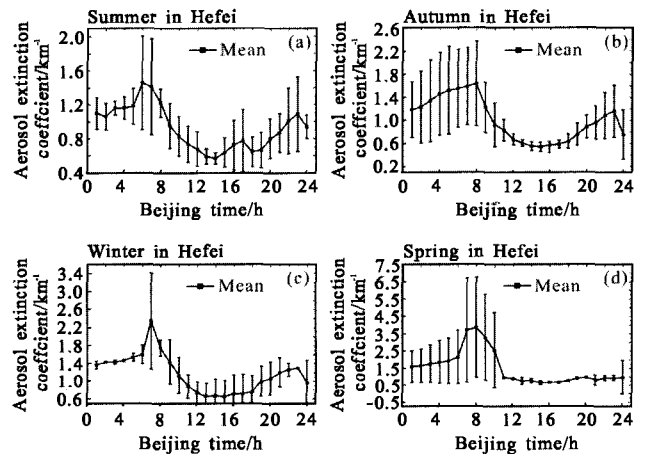


图3 合肥地区大气消光系数变化特征

Fig.3 Aerosol extinction coefficients changes in Hefei

较大,空气中含有较多粒子,包括雨、雪、气溶胶等。清晨的温度较低、湿度较高,地面附近的逆温层使污染物不易扩散,是一天中大气能见度最低的时段,气溶胶消光系数也较大;随着太阳上升,日照使得地面空气温度升高、相对湿度降低,逆温层遭到破坏,对流活动增强,有利于污染物的扩散,因此下午 $13:00\sim 16:30$ 一般是一天中能见度最好的时段,相应的气溶胶消光系数也较小。日落使得热力对流活动减弱,逆温层产生,污染物重新集结使得大气能见度下降,在日出前降到最低点,气溶胶消光系数重新增大。

图4给出了四季大气能见度的年变化特征。可以看出,正常天气下平均能见度的日变化有如下特征:下午能见度最大,早晨最小;白天能见度到下午 $14:00\sim 16:00$ 之间达到最大,然后逐渐降低;夜间变化较

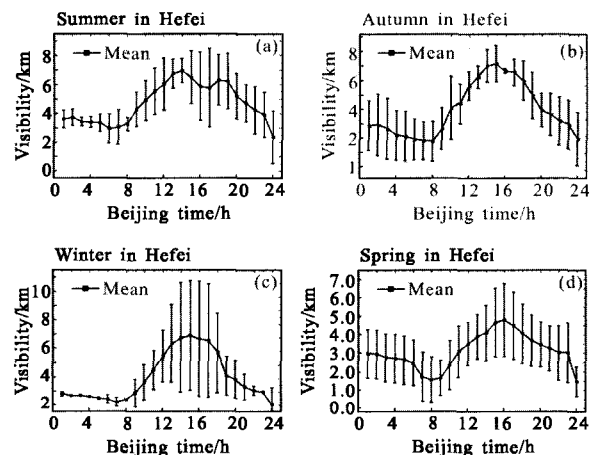


图4 合肥地区大气能见度变化特征

Fig.4 Atmospheric visibility changes in Hefei

小,整体渐降并在日出前达到最低;春季和冬季能见

度较低,冬季最低,平均能见度最低不超过 7 000 m;夏季和秋季的能见度较高,平均能见度的最大值超过 10 000 m;不同季节夜间能见度相差较小。

## 5 总结

给出了 2005 年合肥地区四季的大气能见度和消光系数,同时分析了相应的对比精度。该变化特征为有关环境评价和光学工程试验提供了科学依据。对能见度仪和积分浊度计两者的探测精度进行分析,它们可以满足一般的探测要求的。但对于某些特殊光学工程实验,单独使用任何一台设备进行探测的结果不能满足精度要求。将两台设备的探测结果结合在一起进行统计分析,使得探测结果更加精确。

## 参考文献:

- [1] HAN Yong, RAO Rui-zhong, WANG Ying-jian. Multi-wavelength aerosol optical characteristics obtained by atmospheric visibility [J]. **Infrared and Laser Engineering**(韩永,饶瑞中,王英俭.利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性.红外与激光工程),2007,36(2):265-269.
- [2] WANG Qing-mei, XIE Bang-li, MEI Pin-chen,et al. Discussing the theory and calibration of the forward scatter meter [J]. **Meteorological Hydrographic Oceanographic Instrumentation** (王青梅,谢邦力,梅品琛,等.前向散射能见度仪的原理和标定方法探讨.气象水文海洋仪器),2001,4:10-16.
- [3] FAN Wei, WANG Yi, RAO Rui-zhong. Wavelength band selection method for target detection considering surface reflectivity [J]. **Acta Photonica Sinica**(范伟,王毅,饶瑞中.根据表面反射特性进行目标探测的波段选择.光子学报),2006,35(5):755-759.
- [4] HAN Yong, RAO Rui-zhong, WANG Ying-jian. Influence of aerosol concentration field fluctuation to light wave in limited space [J]. **Chinese J Laser(suppl)**(韩永,饶瑞中,王英俭.有限空间气溶胶浓度场起伏对光波的影响.中国激光(增刊)),2006,33(suppl):268-271.
- [5] HAN Yong. Measurements and statistical characteristics of atmospheric aerosol optical properties [D]. Anhui:Institute of optics and fine mechanics, Chinese Academy of Science (韩永.大气气溶胶光学特性综合测量及统计特征分析.合肥:中国科学院安徽光机所),2006:46-55.
- [6] RAO Rui-zhong. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere [J]. **Infrared and Laser Engineering** (饶瑞中.激光大气传输湍流与热晕综合效应.红外与激光工程)2006,35(2):130-134.
- [7] FENG Bao-hong, CHEN Shu-hai, Wen Kai-zhang, et al. The restoration processing for degradation caused by random medium [J]. **Acta Photonica Sinica**(冯保红,陈书海,文开章,等.消随机媒质退化的复原处理.光子学报),2003,32(9):1133-1137.
- [8] MIDDLETON W E. **Vision Through The Atmosphere** [M]. Canada:University of Toronto Press, 1958.
- [9] LIAN Yue, LIU Wen-qing, ZHANG Tian-su, et al. Measurement analysis of atmospheric aerosol aerodynamics size with apd detector [J]. **Acta Photonica Sinica**(连悦,刘文清,张天舒,等.利用 APD 对大气气溶胶空气动力学直径测量分析.光子学报)2005,34(12):1837-1840.
- [10] KOSCHMIEDER H. Theories der horizontalen Sichtweite [J]. **Beitr Phys Freien Atm**,2005,12(1):171-181.
- [11] TONNA G, SHIFRIN K S. Reliability of polar nephelometer for the measurement of visibility in fog [J]. **Applied Optics**, 1992,31:2932-2941.
- [12] MILL C S, LACEY D, GAY M J. A novel device to measure atmospheric visibility [J]. **Measurement Science Technology**, 1994,5:1505-1512.
- [13] BENDIX J. Determination of fog horizontal visibility by means of NOAA-AVHRR [J]. **Int J Remote Sensing**, 1995,3(10-14):1847-1849.
- [14] KOPEIKA N S. Effects of aerosols on imaging through the atmosphere: a review of spatial frequency and wavelength dependent effects [J]. **Optical Engineering**, 1985,24(4):707-712.
- [15] CHAN Y C, SIMPSON R W, McTAINSH G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. **Atmos Environ**,1999,33(19):3237-3250.
- [16] APPEL B R, HEALTH Serv. Berkeley visibility as related to atmospheric aerosol constituents [J]. **Atmos Environ**,1985,19(9):1525-1534.
- [17] HAN Yong, XIE Chen-bo, RAO Rui-zhong, et al. Comparison and analysis of two visibility detecting methods based on optical scatter technology [J]. **Infrared and Laser Engineering** (韩永,谢晨波,饶瑞中,等.基于光散射技术的两种能见度探测方法的比较分析.红外与激光工程),2006,35(2):173-176.
- [18] HORVATH H. Atmospheric Visibility [J]. **Atmos Environ**, 1981,15(10/11):1785-1796.