

# 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与 大气能见度的研究

孟祥谦<sup>1,2</sup> 胡顺星<sup>1</sup> 王英俭<sup>1</sup> 胡欢陵<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 提出一种测量大气气溶胶散射相函数及能见度的方法, 并且设计了以半导体激光器为光源和电荷耦合器件 (CCD) 为探测器的实验装置, 利用该实验装置测量了  $15^\circ \sim 45^\circ$  的散射灰度值角分布。根据激光雷达方程和 Henyey-Greenstein 散射相函数理论, 拟合气溶胶的相函数分布, 计算其能见度。将拟合得到的相函数和计算的能见度的结果分别与 POM 天空辐射计和 Belfort 能见度得到的观测结果进行对比, 结果表明两者一致性较好, 证明了利用激光光源和 CCD 测量气溶胶相函数和能见度的可行性。

**关键词** 大气光学; 气溶胶散射相函数; 能见度; 电荷耦合成像器件

中图分类号 P414 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0901001

## Aerosol Scattering Phase Function and Visibility Based on Charge Coupled Device

Meng Xiangqian<sup>1,2</sup> Hu Shunxing<sup>1</sup> Wang Yingjian<sup>1</sup> Hu Huanling<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A new method is presented to measure aerosol scattering phase function and visibility, and an experimental system which uses semiconductor laser as the light source and charge coupled device (CCD) as the detector of scattering light is constructed. The grey level of  $15^\circ \sim 45^\circ$  distribution is measured by the system. The aerosol scattering phase function is fitted and the atmospheric visibility is calculated based on the method. The results have good agreement with the results of POM sky radiometer and Belfort visibility meter, and this method is feasible to measure aerosol scattering phase function and visibility.

**Key words** atmospheric optics; aerosol scattering phase function; visibility; charge coupled imaging device

**OCIS codes** 010.1310; 290.5820; 040.1520; 150.5495

## 1 引言

气溶胶散射相函数是研究气溶胶微观光学特性的重要参数<sup>[1,2]</sup>, 可以反映出气溶胶的尺度、复折射率等, 而能见度是大气气溶胶浓度的宏观表示, 也是气象环境部门表征空气质量的常用参数<sup>[3]</sup>, 对天气预报、交通安全和城市污染等许多实际问题有着十

分重要的意义。因此研制高精度的气溶胶实时探测仪器显得愈加重要。

目前已有多种方法用于大气气溶胶散射相函数和能见度的探测, 常用的技术有被动遥感像太阳光度计<sup>[4]</sup>和天空辐射计等, 典型的仪器是日本的 POM 系列天空辐射计<sup>[5]</sup>。能见度仪器探测手段相对较多, 最

收稿日期: 2012-03-01; 收到修改稿日期: 2012-04-12

基金项目: 科技基础性项目(2007FY110700)和中国科学院知识创新方向性项目(KJXC2-EW-N07)资助课题。

作者简介: 孟祥谦(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: blunt.m@qq.com

导师简介: 胡顺星(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

早气象部门使用传统的目测法,这种方法受观测人员生理、心理因素影响,具有较大的主观性并且观察范围有限,特别是夜间观测精度难以保证。能见度测量仪器方面主要有散射法和透射法两种<sup>[6]</sup>。散射式能见度仪生产商主要有 Visala, Belfort, Biral. LTD, EnviroTech, OpticalScientific, Qualimetrics 等<sup>[7]</sup>。陈安军<sup>[8]</sup>提出利用前向散射实现的双光路能见度激光测量系统,是在前向单角度散射能见度仪基础上的改进,采用的是双光源双采集器对称设计,消除了光源能量不稳定和光电干扰信号影响,散射角取  $30^\circ$ , 散射相函数取值面临误差。谢晨波等<sup>[9]</sup>提出使用车载式激光雷达探测能见度,唐磊等<sup>[10]</sup>提出使用半导体激光器作为光源的激光雷达探测能见度,两个雷达的原理一致,都是使用望远镜接收激光回波,然后进行信号处理,该方法同样会对散射相函数取定标值(后向  $180^\circ$  散射角)。利用前向散射测量的理论关键是选择一个通常取在  $33^\circ$  的前向散射角度<sup>[11]</sup>, 测量并计算这个角度的散射相函数值,以此值为仪器定标常数。这也成为它最大的误差来源<sup>[12]</sup>, 因为大气中气溶胶成份类型、粒子大小和折射率等参数改变会导致相函数变化,即在不同天气下该常数是不同的,所以如果将其标定为一个常数,那么将会引起一定误差。Meki 等<sup>[13]</sup>和 Barnes 等<sup>[14]</sup>使用电荷耦合器件(CCD)测量随高度分布的气溶胶总散射系数,在相函数的处理上,Barne 等使用 NASA/Aeronet 上的数据通过插值求得,这样准确度提高,但是便利性降低了。另外一种采用透射法的仪器也在产品化使用,最具代表性的是芬兰的 MITRAS 系列透射式能见度仪<sup>[7]</sup>。大气能见度透射式测量比散射式测量具有更好的直接性,但大气透射式能见度仪在光学对准和地基安装等方面,要求比散射式更高。

本文提出了一种测量大气气溶胶相函数及能见度的新方法,根据激光雷达方程和 Henyey-

Greenstein (HG) 散射相函数理论,推导了测量理论。该方法为主动遥感,排除了信号源如日光等因素的影响。在测量大气气溶胶相函数方面,百万像素的 CCD 在分辨率上远远高于其他仪器;在测量能见度上使用了多角度散射,精度比单角度测量定标准确,而且比传统激光雷达方式成本低,移动性强。

## 2 测量原理

### 2.1 大气散射

大气中的尘埃、烟雾粒子等气溶胶是大气光学散射的主要作用载体,散射光沿气溶胶立体角方向向四面八方散射,为了表示散射光强度随散射角度  $\theta$  的变化,定义  $\theta$  方向的角散射截面  $\beta(\theta)$  与所有方向角散射截面平均值  $\frac{\beta_s}{4\pi}$  之比为相函数<sup>[15~17]</sup>:

$$\beta(\theta) = \frac{\beta_s}{4\pi} P(\theta), \quad (1)$$

式中  $P(\theta)$  为散射相函数。

米氏散射理论求出的解析式是级数展开的,不便于计算,估算尺度和折射率计算相函数可靠性又不高,1941 年 Henyey 等<sup>[18]</sup>提出通过不对称因子  $g$  求相函数的近似公式:

$$P_{HG}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (2)$$

该公式简单又基本体现了粒子的散射特性,所以在测量云和气溶胶上广泛使用。光在大气传播过程中与气溶胶发生散射吸收作用,对于大多数气溶胶而言,吸收效应远远小于散射效应,因而吸收部分通常忽略不计。由大气散射系数计算大气能见度<sup>[19]</sup>:

$$V = \frac{3.912}{\sigma_s}, \quad (3)$$

式中  $V$  为能见度,  $\sigma_s$  为总散射系数。

### 2.2 CCD 测量原理

实验几何结构如图1所示,激光器水平出射一

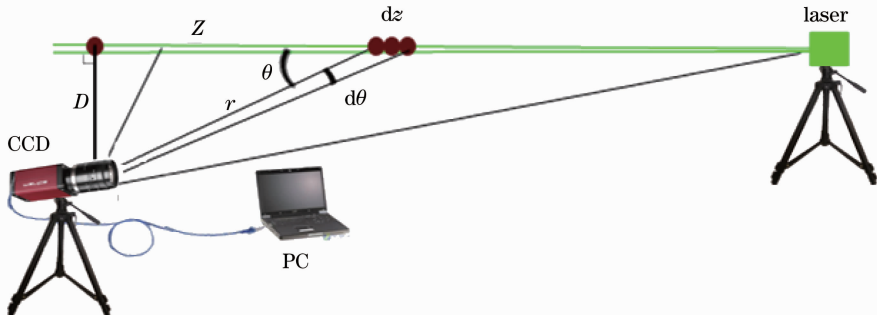


图 1 实验几何结构图

Fig. 1 Geometrical structure of experiment

束激光, CCD 放置于激光束侧前方向采集散射图像, 计算机(PC)同步接收。在散射角度为  $\theta$ , 角度范围为  $d\theta$ (对应长度为  $dz$ ) 的散射能量  $E$  为

$$E = K_1 E_0 A \frac{\beta_N(z) T_z T_r dz}{R^2}, \quad (4)$$

式中  $K_1$  为系统常数,  $A$  为 CCD 镜头面积,  $E_0$  为半导体激光器出射激光能量,  $\beta_N(Z)$  为  $Z$  处大气与气溶胶粒子的角散射系数,  $T_z$  表示  $Z$  方向上的透射率,  $T_r$  表示  $r$  方向上的透射率。

在实际实验中测量  $\theta$  角度在  $18^\circ \sim 45^\circ$  之间,  $Z$  程与  $R$  程长度之和在  $1 \sim 3.8$  m 之间, 以能见度为 2000 m 计算, 消光系数由(3)式可求得  $\sigma = 1.956 \text{ km}^{-1}$ , 根据透射率公式<sup>[20]</sup>, 最大衰减为

$$T_z T_r = \exp \left[ - \int_0^z \sigma(\lambda_z, z) dz - \int_0^r \sigma(\lambda_r, r) dr \right] = 98.53\%, \quad (5)$$

由此可见激光能量衰减影响不大, 所以公式中把透射率视为 1, 于是(4)式化简为

$$E = K_1 E_0 A \frac{\beta_N(z) dz}{R^2}, \quad (6)$$

在几何结构上, 注意到有关系式:

$$Z = D / \tan \theta, \quad (7)$$

式中  $D$  为 CCD 距离光束的垂直距离, 对(7)式两边求导有

$$dz = D(-d\theta / \sin^2 \theta) = D(-d\theta) / (D^2 / R^2) = -\frac{R^2}{D} d\theta, \quad (8)$$

式中出现负号是因为在定义的坐标系内,  $d\theta$  是散射角从大向小角度方向变化, 变化率为负数。将(8)式代入(5)式得

$$E = -\frac{K_1 A d\theta}{D} \beta_N(\theta), \quad (9)$$

式中  $\beta_N(\theta)$  为散射角为  $\theta$  时大气粒子的角散射系数, 包含分子的角散射系数  $\beta_{\text{Natm}}(\theta)$  与气溶胶粒子的角散射系数  $\beta_{\text{Naer}}(\theta)$ 。于是公式展开为

$$E = -\frac{K_1 A d\theta}{D} [\beta_{\text{Naer}}(\theta) + \beta_{\text{Natm}}(\theta)], \quad (10)$$

根据气溶胶角散射系数公式<sup>[20]</sup>:

$$\beta_{\text{Naer}}(\theta) = \int_0^\infty \beta_{\text{aer}}(\theta) N_{\text{aer}}(r) dr, \quad (11)$$

式中  $\beta_{\text{aer}}(\theta)$  为角散射系数,  $N_{\text{aer}}(r)$  为大气气溶胶谱密度。(11)式的含义是对粒子谱积分, 若假设实验场地所测水平区域 4 m 内等效为均匀混合的一种气溶胶粒子, 粒子数密度为  $N_{\text{aer}}$ , 那么(11)式可简

化为

$$\beta_{\text{Naer}}(\theta) = N_{\text{aer}} \beta_{\text{aer}}(\theta), \quad (12)$$

将(1)式代入(12)式中可得

$$\beta_{\text{Naer}}(\theta) = \frac{\beta_{\text{saer}}}{4\pi} N_{\text{aer}} P_{\text{aer}}(\theta) = \frac{\sigma_{\text{saer}}}{4\pi} P(\theta), \quad (13)$$

式中  $\sigma_{\text{saer}}$  为大气气溶胶总散射系数。最后将(13)式代入(10)式中:

$$E = K_2 [\sigma_{\text{saer}} P(\theta) + 4\pi \beta_{\text{Natm}}(\theta)], \quad (14)$$

式中  $K_2 = -\frac{K_1 A d\theta}{4\pi D}$  为常数, 分子的角散射系数  $\beta_{\text{Natm}}(\theta)$  可根据实验地点实际大气状态求出大气分子的角散射系数。

### 3 测量仪器

实验设备主要是由一个普通的半导体 550 nm 激光器和一个 CCD 相机组成。CCD 相机是德国 AVT 公司的 Manta 系列百万像素黑白工业相机。Manta 系列相机稳定可靠、设计紧凑并采用坚实的金属外壳封装, 它的主要参数如表 1 所示, 光的强弱以电压大小记录, 输出为数字格式时以 14 bit 输出。

表 1 Manta G-201B 相机参数

Table 1 Specifications of Manta G-201B camera

Feature	Specification
Interface	IEEE 802.3 1000baseT
Resolution	1624 pixel × 1234 pixel
Sensor	Sony ICX274
Sensor Size	Type1/1.8
Max frame rate at full resolution	14 frame/s
Analog to digital	14 bit
Exposure time	108.6 $\mu\text{s} \sim 60$ s
Dark current at 60 $^\circ\text{C}$	8 mV/400 mV

CCD 传感器是日本的 Sony ICX274, 具有高灵敏度、低暗电流噪声的特点, 适合于连续可变快门曝光采集。并且 CCD 传感器在光谱响应曲线上, 如图 2 所示, 在绿光上量子效率最高。

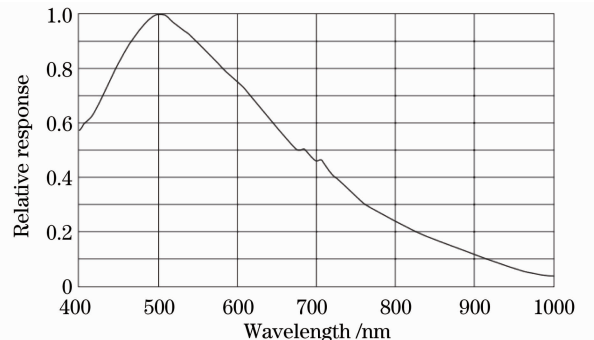


图 2 CCD 的光谱响应

Fig. 2 Spectral response of CCD

参与对比的 Belfort 6230A 型能见度传感器使用了一个高强度的氙气闪光灯,利用前向散射原理来测量大气的消光系数和能见度。日本的天空辐射计 POM 是一款灵敏的长期自动测量太阳直接辐射和散射辐射的太阳辐射计,能以七种波长来计算包括光学厚度、散射系数、气溶胶相函数、气溶胶分布和能量分布等大气参数。安徽省高速公路气象观测站针对高速公路恶劣气象条件监测的需求,在全省高速公路沿线 160 个气象监测站全部建成并投入试运行,可以实时在线对气温、湿度、降水、风向、风速和能见度等要素进行观测。

## 4 数据采集及处理

### 4.1 数据采集

为了减小白天其他光照噪声的影响,实验选在

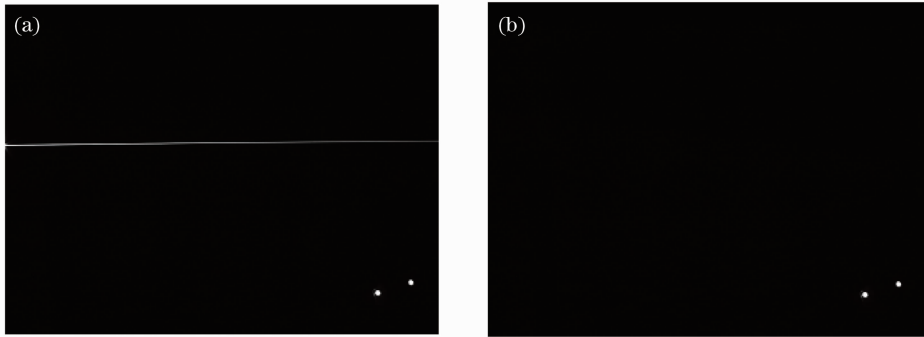


图 3 CCD 接收的(a)有散射光的图像和(b)无散射光图像

Fig. 3 (a) Image with scattering light and (b) without scattering light received by CCD

将处理过的图像进行每层像素累加计算,使用 Matlab 软件进行非线性多参数拟合,依次是包含噪声的信号、噪声和扣除噪声并平滑的信号,反演出相函数、不对称因子与总散射系数,由不对称因子代入 HG 公式又可以得出 HG 散射相函数。

### 4.2 相函数对比结果

CCD 实验系统在 2011 年 10 月 31 日晚上 20:10

晚上且相对空旷的院子里进行。经过多次实验及数据处理,选定 CCD 与激光器的距离为 3.86 m,激光束方向和激光器与 CCD 连线方向成  $15^\circ$  夹角为最合适计算的数值。半导体激光器出射 550 nm 绿光,调整 CCD 使用成像范围覆盖从激光器出光点处附近,使散射光束成像如图 3 所示。需要注意的是,将 CCD 的 Gamma 值设置为 1<sup>[21]</sup>,那么散射光强与 CCD 接收到的电压正比例关系,同时也与成像灰度值成正比例关系。使用千兆网口控制 CCD 的曝光时间,采用缩小光圈长时曝光的方式可以测得比较稳定的散射光,同时提高信噪比。在每次短时间测量的前后,都要分别采集一次无激光出射图像,以作为散射光背景与 CCD 自身的暗噪声一并扣除,如图 3 所示。

到 21:10 之间,每隔 10 min 测量 10 组数据、10 组背景进行计算;2011 年 12 月 02 日在 21:10 到 22:40 之间,每 15 min 测一次。图 4 给出了由 CCD 反演与天空辐射计 POM 反演的相函数对比曲线(彩图见电子版),其中红色曲线为天空辐射计 500 nm 波段反演的气溶胶散射相函数,黑色曲线为 CCD 测得气溶胶相函数,蓝色曲线为将不对称因子代入 HG 公式

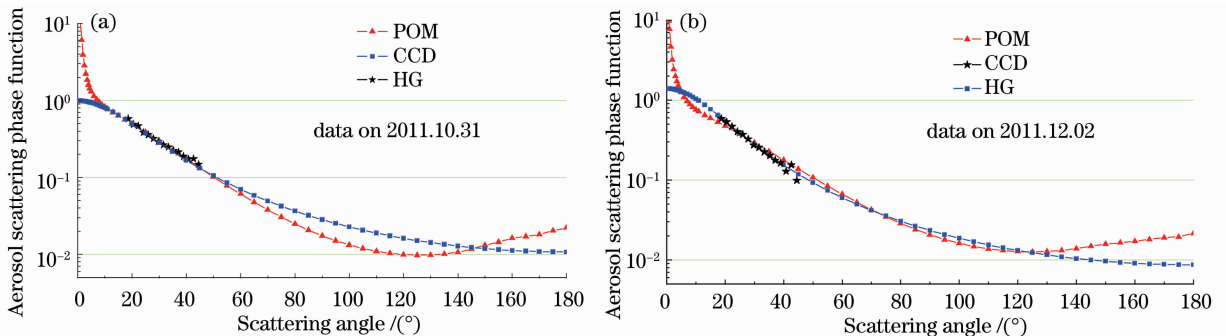


图 4 气溶胶散射相函数结果比较

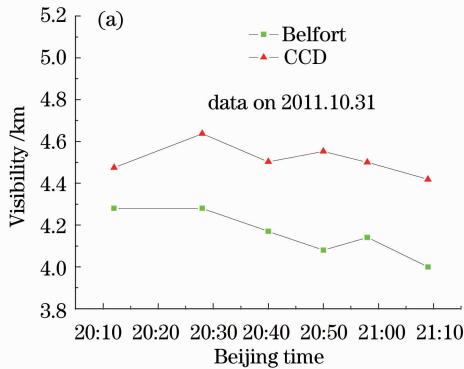
Fig. 4 Comparison of aerosol scattering phase function

得出的相函数。在 CCD 的测量角度范围内三者吻合较好,因此 CCD 反演气溶胶相函数是可行的。从图中还可以看到在  $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$  范围内 HG 相函数与天空辐射计差别不大,而 CCD 得到的相函数抖动较大。这是因为在 CCD 镜头边缘部分有像差,造成成像不均匀。在 CCD 测量角度以外, HG 散射相函数与天空辐射计 POM 对比在  $10^{\circ}\sim 140^{\circ}$  效果比较理想,在  $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$  与  $140^{\circ}\sim 180^{\circ}$  即两极角度上差异比较大,这是由于 HG 相函数只是一个近似公式,只近似反映出气溶胶散射能力。

### 4.3 能见度对比结果

Belfort 能见度仪器放置于附近实验室的五层楼顶,观测结果每 15 min 在 PC 上记录一次。安徽省测高速公路气象观测站观测的数据每隔 1 min 在网页上发布。

图 5 给出了 CCD 测得能见度与 Belfort 仪器、



安徽省高速公路气象观测站观测的能见度对比曲线。图 5(a)显示 Belfort 能见度仪与 CCD 测量结果趋势近似,有两个小峰值,和一个谷值,有一个折线型的能见度浮动,不同之处是 CCD 测得的能见度值偏大,并且起伏也稍大,主要原因是两者相距一段距离,与风场、地面环境有关,并且由于处于不同高度上,气溶胶的浓度会略有差别。图 5(b)为安徽省高速公路观测站的能见度数据与 CCD 测量的能见度曲线,两者在 21:15 到 22:15 一个小时内变化都比较缓慢,而高速公路测得数据有起伏,并且高速公路测得的数据比 CCD 测得能见度偏小并且浮动较大,是因为公路上的汽车尾气排放造成。两者在 22:15 的数据点同时落到谷值,并在 22:45 回升,表明 CCD 能正确反映能见度趋势,两者的绝对数值不同,是由于地点不相同、并且 CCD 采用多角度拟合,而高速公路的探测方式则是单角度定标测量。

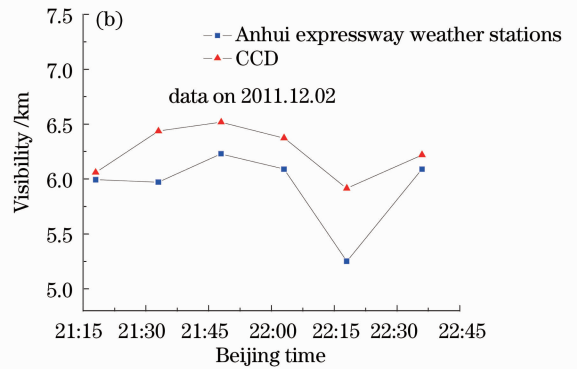


图 5 能见度对比

Fig. 5 Comparison of visibility

## 5 结 论

提出了一种测量大气气溶胶相函数及能见度的新方法。实验设备中的百万像素 CCD 提高了测量角散射光的角分辨率,因此此系统测量的气溶胶散射相函数更接近于真实值。在测量能见度理论中未使用假设值,并且使用了多角度测量比单角度测量定标更准确。比传统激光雷达方式成本低,移动性强。测量结果对比显示此方法具有可靠性和可行性。当前系统缺陷也较明显,白天日光会导致噪声太大,滤光片也难以压制,所以目前只能在晚上进行实验。当激光波长选择在大气窗口以外或者使用比日光更强的闪光灯来压制噪声则有白天观测的可能。

致谢 感谢王珍珠提供了天空辐射计数据,魏合理

提供了能见度仪器数据,安徽省高速公路气象观测站网提供了能见度观测数据。

### 参 考 文 献

- 1 Y. Kaufman, A. Gitelson, A. Karnieli *et al.*. Size distribution and scattering phase function of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements[J]. *J. Geo. Physical Research*, 1994, **99**(5): 10341~10356
  - 2 M. Wang, H. R. Gordon. Retrieval of the columnar aerosol phase function and single-scattering albedo from sky radiance over the ocean: simulations [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (24): 4598~4609
  - 3 R. Charlson. Atmospheric visibility related to aerosol mass concentration: review [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1969, **3**(10): 913~918
  - 4 He Qianshan, Yang Yinming, Geng Fuhai *et al.*. Algorithm comparison of aerosol parameter retrieval from sunphotometer measurements[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, **68** (3): 428~438
- 贺千山, 杨引明, 耿福海等. 太阳光度计反演气溶胶参数的方法比较[J]. 气象学报, 2010, **68**(3): 428~438

- 5 T. Nakajima, G. Tonna, R. Rao *et al.*. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2672~2686
- 6 Zeng Shuer, Wang Gaili. Observation and instrument of visibility [J]. *Quarterly J. Appl. Meteorology*, 1999, **10**(2): 207~212  
曾书儿, 王改利. 能见度的观测及其仪器[J]. 应用气象学报, 1999, **10**(2): 207~212
- 7 J. D. Crosby. Visibility sensor accuracy: what's realistic[C]. American Meteorological Society Annual Meeting, Long Beach, CA-13
- 8 Chen Anjun. Dual-light-path laser detection system for visibility by forward scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, **30**(4): 304~308  
陈安军. 利用前向散射实现的双光路能见度激光测量系统[J]. 红外与激光工程, 2001, **30**(4): 304~308
- 9 Xie Chenbo, Han Yong, Li Chao *et al.*. Mobile lidar for visibility measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(7): 971~975  
谢晨波, 韩永, 李超等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(7): 971~975
- 10 Tang Lei, Shu Zhifeng, Dong Jihui *et al.*. Measurement of slant visibility and its iteration method with diode-laser lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(5): 963~967  
唐磊, 舒志峰, 董吉辉等. 半导体激光雷达斜程能见度观测和反演方法[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(5): 963~967
- 11 Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian. Measurement and analysis of atmospheric visibility and aerosol extinction characteristics based on scattering statistical[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 663~666  
韩永, 饶瑞中, 王英俭. 基于散射法原理的能见度及气溶胶消光特性测量分析[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(4): 663~666
- 12 Li Hao, Sun Xuejin. Theoretical analysis on measurement error of forward scattering visibility meter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(6): 1094~1098  
李浩, 孙学金. 前向散射能见度仪测量误差的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(6): 1094~1098
- 13 K. Meki, K. Yamaguchi, X. Li *et al.*. Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1318~1320
- 14 J. E. Barnes, S. Bronner, R. Beck *et al.*. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(15): 2647~2652
- 15 K. N. Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. London: Academic Pr, 2002. 88~102
- 16 Yin Hong. Fundamentals of Atmospheric Radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993. 59~70  
尹宏. 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993. 59~70
- 17 Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 42~43  
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 42~43
- 18 L. G. Henyey, J. L. Greenstein. Diffuse radiation in the galaxy [J]. *Astrophysical Journal*, 1941, **93**: 70~83
- 19 Zhou Xiuji. Advanced Atmospheric Physics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 906~950  
周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 906~950
- 20 Sun Jingqun. Laser Atmospheric Detection[M]. Beijing: Science Press, 1986. 26~206  
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 26~206
- 21 You Xiong. A method of transforming digital video signals into display colorimetry and vice versa based on Gamma correction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1995, **24**(1): 57~63  
游雄. 基于Gamma校正的数字视频信号与显示色度的变换方法[J]. 测绘学报, 1995, **24**(1): 57~63

栏目编辑: 李文喆