

# CCD 激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布

孟祥谦 胡顺星 王珍珠 胡欢陵 王英俭

(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)

**摘要** 提出了一种反演边界层以下气溶胶消光系数垂直廓线的方法。设计了一种以电荷耦合器件(CCD)为探测器、激光器为发射端的收发分置激光雷达系统(CCD 激光雷达)。基于此系统测量了水平激光束图像与垂直激光束从地面起 0~1.2 km 高度的气溶胶角散射灰度图像。利用水平散射图像得到大气散射相函数相对值,将其作为参数反演了垂直方向的气溶胶消光系数分布廓线。将得到的消光系数值与合肥大气辐射观测站的双波长偏振米散射激光雷达(DWPL)的观测结果进行了对比,结果表明两者一致性较好。同时给出了合肥地区 4 个夜晚连续观测的气溶胶廓线分布。CCD 激光雷达优势在于无盲区,在近地面空间分辨率可达 0.032 m/pixel,在边界层以下气溶胶探测具有潜力。

**关键词** 大气光学; CCD 激光雷达; 边界层; 气溶胶消光系数廓线; 气溶胶散射相函数

**中图分类号** P414 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0801003

## Vertical Distribution of Aerosol Extinction Coefficient Detection in Boundary Layer Using CCD Lidar

Meng Xiangqian Hu Shunxing Wang Zhenzhu Hu Huanling Wang Yingjian

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

**Abstract** A method for the retrieval of the aerosol scattering coefficient profiles in boundary layer is presented. A bistatic lidar system (CCD Lidar) with charge coupled device (CCD) as the detector and laser as transmitter is constructed. Aerosol scattering images of a horizontal laser beam and a vertical laser beam from ground to 1.2 km are imaged based on the CCD lidar system. The relative atmospheric scattering phase function (SPF) can be obtained by the aerosol scattering image of the horizontal laser beam, and the aerosol extinction coefficient (AEC) profile is inverted using the relative SPF. The AEC measured by CCD lidar has shown good agreement with that measured by double wavelength polarization lidar (DWPL) in 400 m and 600 m. Four nighttime AEC profile contours observed in Hefei are given. CCD lidar needs no overlap correction, it has a high spatial resolution of 0.032 m/pixel, and is expected as a potential technique of aerosol detection in boundary layer.

**Key words** atmospheric optics; CCD lidar; boundary layer; aerosol extinction coefficient profile; aerosol scattering phase function

**OCIS codes** 010.0280; 010.1100; 010.1290; 010.3640

## 1 引言

大气气溶胶是指固体或液体微粒稳定地悬浮于大气中形成的分散体系<sup>[1]</sup>,是大气中极其重要的组成部分,地球表面大气边界层以下的气溶胶不仅直

接影响了人类的健康,还催化了大气中的各种化学反应,引起了地球气候系统其他要素的变化<sup>[1-2]</sup>,故大气边界层气溶胶的探测具有十分重要的意义。

边界层以下气溶胶光学参数的探测手段多种多

**收稿日期**: 2013-03-04; **收到修改稿日期**: 2013-04-15

**基金项目**: 国家重大科研仪器设备研制专项(41127901)、国家自然科学基金青年基金(41205020,41005015)、国家 973 计划(2013CB955802)

**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(1965—),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)

样,按照测量高度分为定点仪器与具有空间分辨能力的仪器两类。定点仪器如安徽光学精密机械研究所自行研制的粒子计数器可以精确测量出所在位置的粒子谱、粒子折射率、大气能见度等参数<sup>[3]</sup>;太阳辐射计可以测量出整层大气的光学厚度,能够很好地反演出大气浑浊度等参数<sup>[4]</sup>。具有时空分辨探测能力的仪器有激光雷达与探空气球等,激光雷达包括地基、车载、机载、星载等<sup>[5-6]</sup>,在平流层火山灰传输与沉降过程的观测中有明显优势<sup>[7]</sup>,但激光雷达在接收端附近有一段盲区及较长的过渡区,虽然过渡区可以进行几何因子校正<sup>[8]</sup>,但是校正会带来一定误差。数据可靠又具有时空分辨能力的只有探空实验<sup>[9]</sup>,但是放球成本相对昂贵,也不可能做到连续观测。

自行设计的 CCD 激光雷达系统没有盲区与过渡区,在近地面垂直空间分辨率达 0.032 m/pixel,在结构上与 Barnes 等<sup>[10-11]</sup>设计的 CCD 激光雷达相似,不同之处是使用 CCD 对水平激光束成像,得到大气散射相函数(SPF)相对值,进而参与反演垂直方向的气溶胶消光系数廓线。该方法使 CCD 激光雷达不依赖于第三方仪器提供气溶胶 SPF。

## 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,散射光以大气粒子立体角向四面八方散射,所以可以通过测量相关的散射光强来反演出各种大气粒子的光学参数。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 $\beta_s/(4\pi)$ 之比为相函数<sup>[12-14]</sup>:

$$P(\theta) = \beta(\theta)/[\beta_s/(4\pi)], \quad (1)$$

式中 $\beta_s$ 为体消光截面。

为了更好地描述粒子群的光学散射,忽略气溶胶吸收作用,消光系数可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\sigma = \int_0^{\infty} \beta_s(r)n(r)dr, \quad (2)$$

式中 $r$ 为大气粒子半径, $n(r)$ 为粒子谱。

### 2.2 CCD 测量原理

CCD 激光雷达光路几何结构如图 1 所示,激光器垂直出射一束激光,CCD 放置于三角架的云台上,云台有水平仪气泡与俯仰角刻度,便于在不同地形上调节水平和记录准确俯仰角,调整 CCD 到合适

仰角对整个激光束成像,最后由 PC 电脑连续采集接收。 $D$  为 CCD 到激光束的距离。

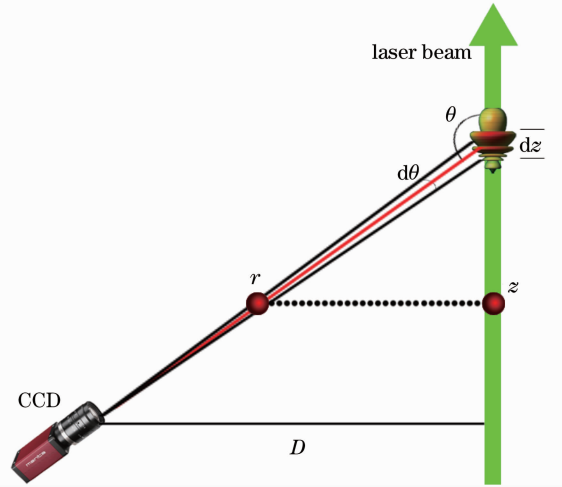


图 1 实验几何结构图

Fig. 1 Geometrical structure of experiment

因部分公式推导过程与文献<sup>[16]</sup>中类似,在此不再赘述公式推导过程。由图 1 可知散射角度为 $\theta$ ,角度范围为 $d\theta$ (对应长度为 $dz$ )的散射光为

$$E(z, \theta) = K_1 \beta(z, \theta) T_z T_r, \quad (3)$$

其中

$$T_z = \exp\left[-\int_0^z \sigma(z) dz\right], \quad (4)$$

$$T_r = \exp\left[-\int_0^r \sigma^*(r) dr\right], \quad (5)$$

$K_1$  为 CCD 镜头面积、激光器出射激光能量、光学效率等系统常数, $z$  为发射激光与大气粒子相互作用路径高度,称为发射光路径高度, $r$  为大气粒子散射光到 CCD 之间的路径长度,称为接收光路径长度, $\beta(z, \theta)$  为高度为 $z$ 、散射角度为 $\theta$ 处大气粒子的角散射系数, $T_z$  表示发射光路径上的透射率, $T_r$  表示接收光路径上的透射率,透射率公式中的 $\sigma(z)$  表示 $z$  高度处的消光系数, $\sigma^*(r)$  表示 $r$  处的消光系数。

在实际实验中接收的散射光角度 $\theta$  在 $95^\circ \sim 175^\circ$  之间,发射光路径长度在 $0 \sim 1.2$  km 之间,接收光路径长度在 $0.22 \sim 1.31$  km 之间,以能见度为 5 km 计算最低大气透射率 $T_z T_r$ 。消光系数为<sup>[17]</sup>

$$\sigma = \frac{3.912}{5} = 0.7824 \text{ (km}^{-1}\text{)}, \quad (6)$$

假设在发射光与接收光路径的空间内有同类气溶胶均匀分布,将 $\sigma = 0.7824 \text{ km}^{-1}$  (实际情况高处消光系数会减小)代入(4)式与(5)式,最大衰减可表示为

$$T_z T_r = \exp \left[ - \int_0^z \sigma(\lambda_z, z) dz - \int_0^r \sigma(\lambda_r, r) dr \right] = 14.03\% \quad (7)$$

由此可见激光能量已经衰减十分严重,所以透射率必须作为参数参与反演,于是将(1)式与(2)式综合代入(3)式中,将角散射系数以 SPF 代替,则

$$E(z, \theta) = K_2 T_z T_r \sigma_s(z) P(\theta), \quad (8)$$

式中  $K_2 = \frac{K_1}{4\pi}$  为常数,公式中含有 SPF  $P(\theta)$ , 即需要实时实地的 SPF 作为已知条件进行反演。Barnes 等借助于其他仪器测得的 4 波段(441, 673, 873, 1022 nm)相函数,取实验前一天与实验后一天进行平均,再进行波段插值得到 532 nm 波段相函数。而通过水平激光束成像的方法得到相函数,如图 2 所示,半导体激光器水平出光,CCD 放置于距

离光束 5 cm 处,采集  $90^\circ$  到接近  $180^\circ$  之间的散射光,进入 CCD 视场的激光束长度只有 2 m,所以发射光路径与接收光路径的两个透射率可近似为 1<sup>[12]</sup>,那么可以得出散射灰度图像中的灰度与 SPF 成正比例关系,即

$$E_2(\theta) = K_3 P(\theta). \quad (9)$$

代入到公式(8)中,得

$$E_1(\theta) = K_4 T_z T_r \sigma_s(z) E_2(\theta). \quad (10)$$

式中  $K_4 = \frac{K_2}{K_3}$ 。通过标准仪器标定  $K_4$  的值,即可用来反演总消光系数。分子的消光系数表示为  $\sigma_{\text{Natm}}$ ,气溶胶消光系数表示为  $\sigma_{\text{Naer}}$ 。本文不考虑气溶胶的吸收作用,因此扣除大气分子消光部分,得到气溶胶消光系数为

$$\sigma_{\text{Naer}} = \sigma_s - \sigma_{\text{Natm}}. \quad (11)$$

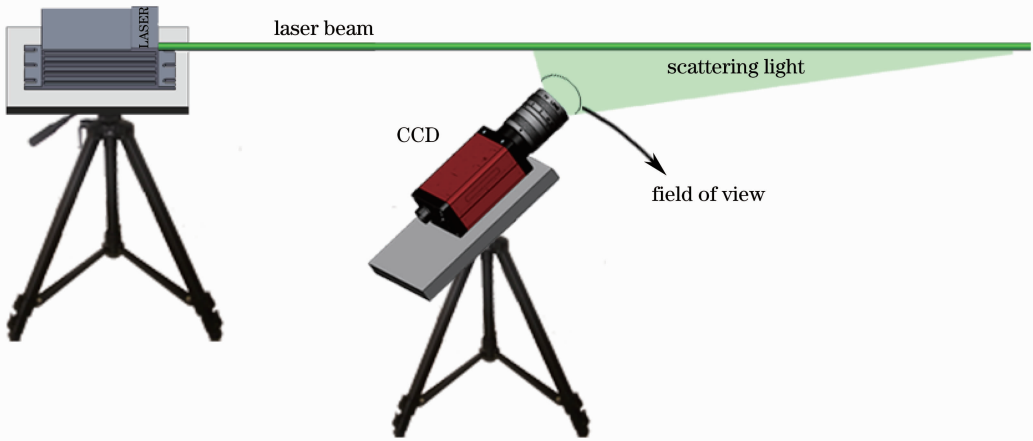


图 2 测水平散射光结构图

Fig. 2 Geometrical structure of horizontal scattering light measurement

### 3 测量仪器

CCD 激光雷达主要由发射端与接收端组成,在测量水平方向激光束时使用了半导体激光器,采集垂直激光束图像时使用了 L625 激光雷达的 532 nm 激光器。接收端是一个工业 CCD 相机配置 AVENIR 的鱼镜头,CCD 的参数与文献[16]相同,鱼镜头的焦距为 3.5 mm,光圈为 F1.4,与 CCD 配合使用水平方向视场角为  $116^\circ$ ,垂直方向视场角为  $101^\circ$ 。

L625 激光雷达自 1991 年运行至今,主要对高层大气成份进行观测,胡顺星等有详细的介绍<sup>[18]</sup>,它的过渡区在 1.5 km 左右,与 CCD 测到 1.2 km 以下的的数据没有重合对比区域。故在对比实验中使用合肥大气辐射观测站的双波长偏振激光雷达

(DWPL),其参数如表 1 所示,可以获得对流层中下部的气溶胶、云以及边界层等垂直高度分布信息,两台仪器相距约 1000 m。

表 1 双波长偏振激光雷达参数

Table 1 Parameters of DWPL

Parameter	Specification
Laser wavelength	532, 1064 nm
Laser energy(pulse)	40 mJ at 532 nm, 60 mJ at 1064 nm
Laser repetition frequency	20 Hz
Spatial resolution	7.5 m
Telescope diameter	200 cm

### 4 数据处理及分析

#### 4.1 数据处理

为了避免白天杂散光的影响,实验选在晚上与

L625 激光雷达同时工作。对水平散射图像依次通过除背景噪声、平滑处理得到光束的散射光灰度值。对垂直廓线的原始图像通常积分 10 s 保存一帧,为了减少漂浮大颗粒灰尘造成的局部误差,增加信噪比,通过 20 帧图像求和处理(相当于 200 s 的积分时间),再采取与水平图像类似的处理方式得到原始灰度值。

水平激光束散射光灰度图像如图 3(a)所示,散射光束左侧较粗是因为激光器在左侧并且 CCD 与激光束垂直距离很近,所以激光束进入 CCD 的视角比较大。反之,右侧 CCD 离激光束较远,激光束进

入 CCD 的视角变小,因此成像时散射光束变窄。图 3(b)中,横轴代表散射角度,纵轴是将灰度序列归一化后灰度图像取出的散射光灰度值,由(9)式知它代表了随角度变化的相对 SPF。本文中假设地面到空中 1 km 的气溶胶类型、尺度变化不大,所以在垂直气溶胶廓线的反演过程中使用了地面得到的相对 SPF。

CCD 对 L625 雷达的 532 nm 波段垂直激光束成像,如图 4(a)所示,激光束左侧有一处较亮的星

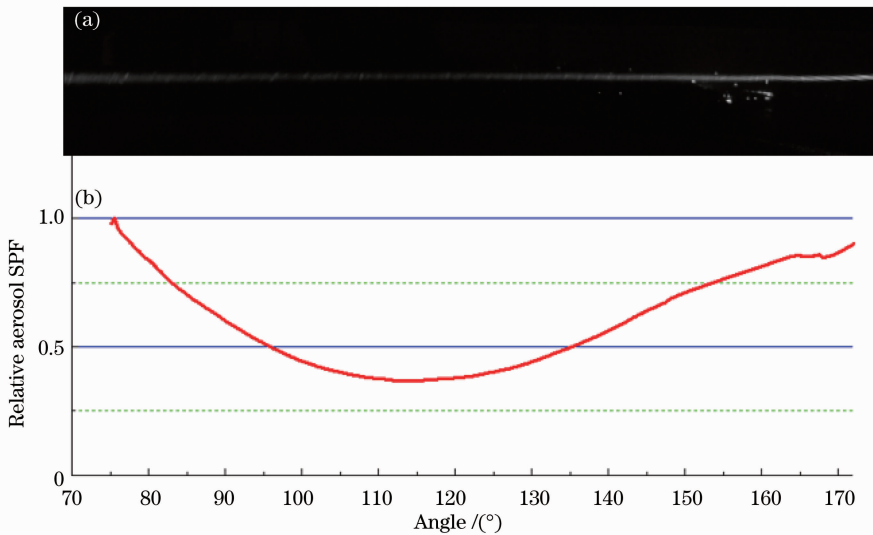


图 3 (a)2012 年 12 月 3 日水平激光散射灰度图像;(b)从图(a)中取出的相对 SPF 曲线

Fig. 3 (a) Grey image of horizontal laser beam on December 3th 2012; (b) relative aerosol SPF of (a)

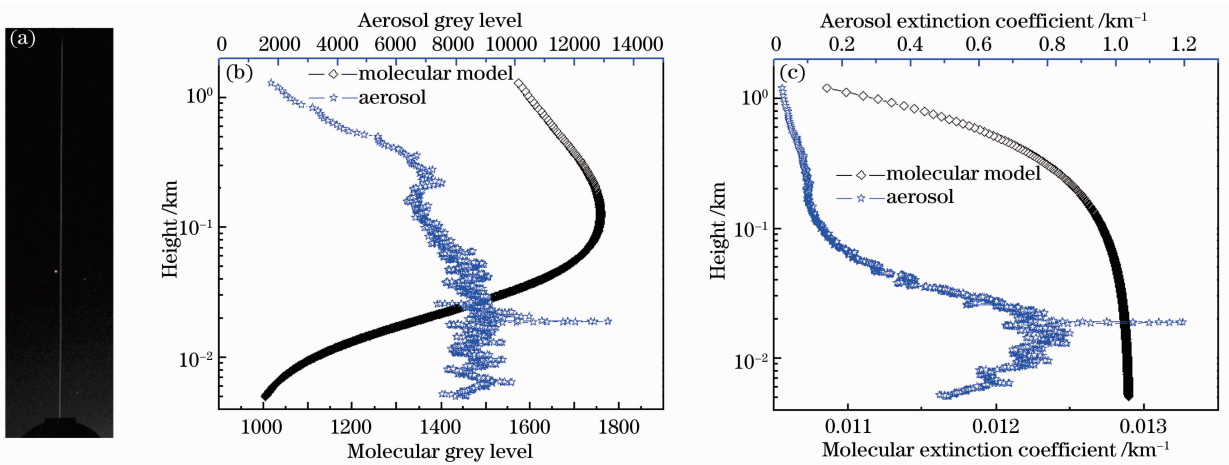


图 4 (a) 2012 年 12 月 3 日垂直散射光图像;(b) 气溶胶与分子模型散射光灰度值曲线;

(c)气溶胶与分子模型的消光系数廓线

Fig. 4 (a) Image of vertical scattering light on December 3th 2012; (b) grey levels of aerosol and molecular model;

(c) extinction coefficient profiles of aerosol and molecular model

光点, 星星随着时间逐渐上升并与激光束重合再分开。星光亮点大约是一个  $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$  的矩阵, 剔除一个固定的矩阵并不难, 但是因为大量图像数据, 随时间变换位置的木星在每个图像中的位置又不统一, 还存在有时又会与激光束重合的情况, 因此对图像中星体的图像识别与剔除造成了一定的难度, 本论文中尚没有剔除星光影响。

如图 4(b) 所示气溶胶与分子模型的散射光灰度值, 纵坐标代表高度, 因气溶胶散射光与分子模型散射光强度差别较大, 图中使用了双横坐标表示。其中空心五星曲线图表示了 2012 年 12 月 3 日测得的气溶胶灰度值, 随着高度增加散射光灰度值有抖动, 中间的一处明显尖峰是因为有星光的影响。110 m 以后散射光灰度值呈现下降趋势主要是透射率下降的原因。空心菱形曲线表示了分子模型的散射光灰度, 从图中看出灰度值先上升, 到 100 m 后下降, 先上升的主要原因在于受到分子 SPF 的影响, CCD 测量高度为  $0 \sim 1 \text{ km}$  时, 其散射角在  $100^\circ$  到接近  $180^\circ$  之间, 这个角度内的分子 SPF 是随角度的单调递增函数。100 m 高度以上大气分子散射光灰度值下降的原因是光传输距离增加导致透射率下降、光传输衰减。

如图 4(c) 所示为气溶胶与分子模型的消光系数廓线, 纵轴为高度, 双横轴分别为气溶胶消光系数与大气分子消光系数。气溶胶消光系数显示了在 20 m 附近有一个气溶胶层(因为实验在 4 楼顶的原因, 气溶胶层距离地面约 30 m), 中间一处突出是因为星光被作为信号反演的原因。大气分子的消光变

化明显是因为分子模型坐标轴量程很小, 实际上地面与空中 1 km 差别  $0.002 \text{ km}^{-1}$ , 从  $0.013 \text{ km}^{-1}$  变化至  $0.011 \text{ km}^{-1}$ 。

#### 4.2 图像像素高度与实际高度的关系

图 5 给出了 CCD 像素个数与实际高度、高度分辨率的对应关系, 横轴是 CCD 像素阵列, 双纵轴中左侧纵轴为对应实际高度, 右侧为每像素对应的高度分辨率。由图 5 中星状图看出 CCD 每个像素对应的高度并不是线性关系, 有底层分辨率高、高层分辨低的特点, 在近地面具有最高分辨率约  $0.032 \text{ m/pixel}$ , 在接近 1.2 km 处分辨率则增大至  $86 \text{ m/pixel}$ 。提升观测高度最简单的方式是增大图 1 中的距离  $D$ , 即将 CCD 放置于距离光束较远的位置, 本文中实验是放置于  $D = 22 \text{ m}$  处, 以  $D$ 、 $z$ 、 $r$

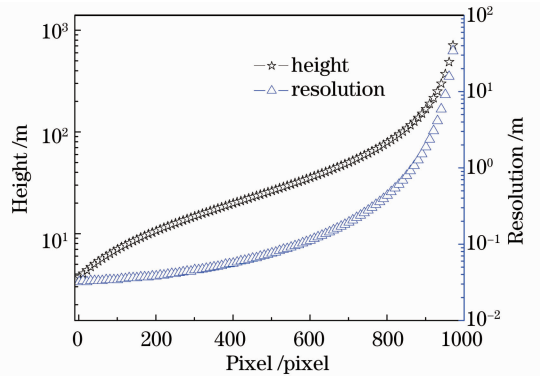


图 5 图像像素与实际高度和高度分辨率的对应关系

Fig. 5 Actual height and resolution corresponding to image pixel

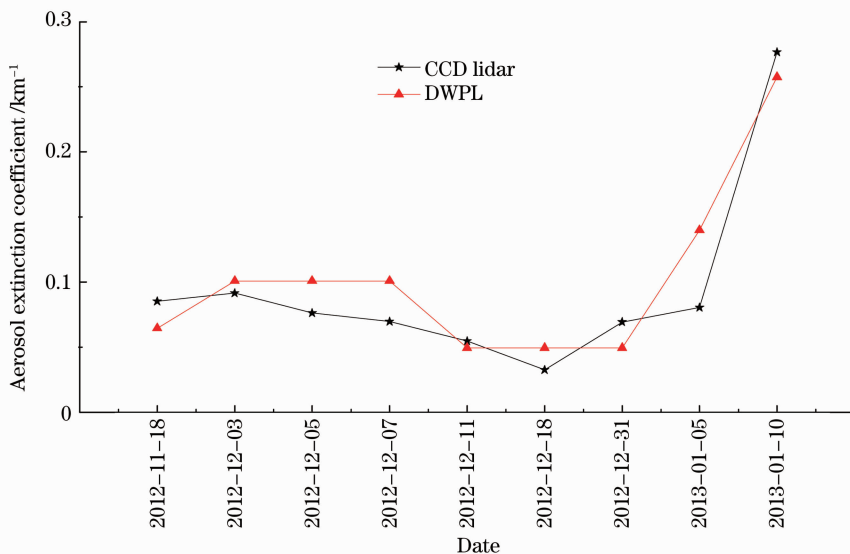


图 6 CCD 激光雷达与 DWPL 激光雷达在 400~600 m 气溶胶消光系数数值对比

Fig. 6 Comparison of aerosol extinction coefficient profiles between CCD Lidar and DWPL at 400~600 m

3 条边组成的三角形,通过几何三角形的相似性可知,如果放置于  $D=220\text{ m}$  处,可使 CCD 可以成像的高度范围扩大至  $0\sim 12\text{ km}$ 。

### 4.3 消光系数值对比结果

DWPL 激光雷达过渡区在  $100\sim 300\text{ m}$ ,所以选取高度在  $400\sim 600\text{ m}$  之间的消光系数的平均值与 CCD 激光雷达的数据作对比,如图 6 所示。纵轴表示平均消光系数值,横轴为日期,在 12 年 12 月 18 日降水后气溶胶消光作用下降明显,又在 13 年 1 月 10 日同时反映出气溶胶粒子的消光作用较强,显示了两者较好的一致性。两个差异出现的原因主要是两台仪器之间有较远的距离,两地的大气状况不可能完全相同。

### 4.4 接收与发射路径大气透射率比较

图 7 是 2012 年 11 月 18 日晚 8 时发射光与接收光路径上的透射率  $T_z$ 、 $T_r$ ,从激光束测量点起,地面第一点发射光路径透射率  $T_z$  为 1,到达  $1.2\text{ km}$  处逐渐衰减到 0.88 左右;因为 CCD 放置于激光束的侧面,那么接收光路径在这一点就有一段水平距

离的消光,所以接收光路径的透射率  $T_r$  在起始第一点就小于 1,并且在所有路径内接收光路径的透射率  $T_r$  总低于发射光路径透射率  $T_z$ 。另外一个特点是发射光与接收光路径两个衰减的趋势相同,并随着高度增加数值越来越接近。

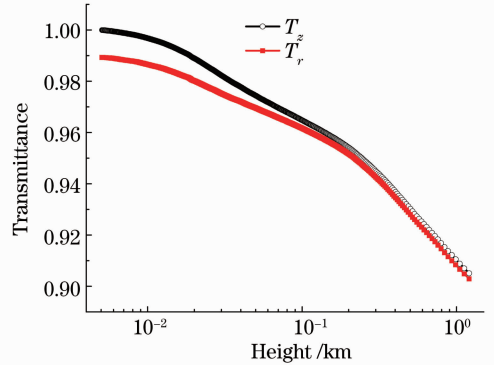


图 7 透射率  $T_z$  与  $T_r$  随高度的变化

Fig. 7 Transmittances of  $T_z$  and  $T_r$  vary with height

### 4.5 气溶胶消光系数的时间演化图

CCD 激光雷达夜间实验时长  $2\sim 3\text{ h}$ 。图 8 显示的是 2012 年 11、12 月份与 2013 年 1 月份的 4 次

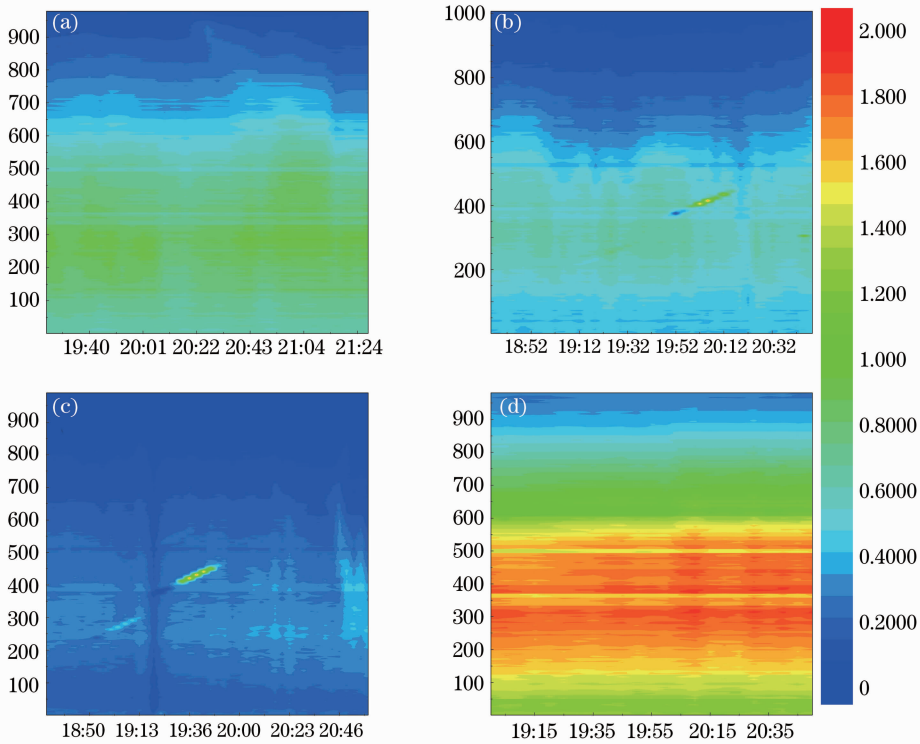


图 8 气溶胶消光系数的时间演化图。(a) 2012 年 11 月 18 日; (b) 2012 年 12 月 11 日; (c) 2012 年 12 月 18 日; (d) 2013 年 1 月 10 日

Fig. 8 Aerosol extinction coefficient contours vary with time. (a) On November 18th in 2012; (b) on December 11th in 2012; (c) on December 18th in 2012; (d) on January 10th in 2013

实验结果,彩图为气溶胶消光系数时间演化图。因为实际高度分布是非线性分布,使用实际高度作图困难,所以彩图中纵轴代表像素高度,横轴代表时间。实验结果的气溶胶消光系数廓线时间分辨率为 200 s。演化图非常明显地显示出气溶胶在近地面的分层状况,以及随时间的变化情况。900 pixel 以下,约实际高度 200 m 以下有较强的气溶胶消光,表明大部分气溶胶悬浮在近地面一层,与毛敏娟等<sup>[19]</sup>得到边界层在早晚间比较低的结论相符合。另外,12月16、17日由于降水的作用,气溶胶粒子数减小,12月18日[图8(c)]消光作用明显要低于11月18日[图8(a)]及12月11日[图8(b)],图8(d)显示了2013年1月10日低能见度情况下到得的消光图,300~500 pixel 之间消光最高值约为  $1.9 \text{ km}^{-1}$ ,能见度仅为 2~3 km,这一结果和安徽省高速公路气象观测站与本文实验地点最近的岗集站能见度结果一致。其中图8(b),(c)在 400~500 pixel 之间,时间在晚上 20:00 以后有一长条形状倾斜的极大值出现,是因为星星升起并与激光束重合,算法中没有剔除星体散射光,对反演结果造成了一定的影响。

## 5 结 论

使用 CCD 作为激光侧向散射光的探测器,设计了一种无盲区、具有高空间分辨率的双端激光雷达系统,在近地面垂直分辨率可达  $0.032 \text{ m/pixel}$ 。提出水平激光束成像法来得到大气 SPF 的相对值,使 CCD 激光雷达无需依赖于第三方测 SPF 的仪器。将得到的消光系数值与合肥大气辐射观测站的双波长偏振米散射激光雷达的观测结果进行了对比验证,结果表明两者具有较好的一致性。目前的问题是 CCD 在白天对激光束成像,得到的图像信噪比非常低。

## 参 考 文 献

- Wang Mingxing, Zhang Renjian. Frontier of atmospheric aerosols researches[J]. Climatic and Environmental Research, 2001, 6(1): 119-124.  
王明星,张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119-124.
- Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, *et al.*. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese J 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.
- Li Xuebin, Gao Yiqiao, Wei Heli, *et al.*. Development of optical particle counter with double scattering angles [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1528-1534.  
李学彬,高亦桥,魏合理,等. 双散射角光学粒子计数器的研制

- [J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1528-1534.
- Zhan Jie, Tan Kun, Shao Shisheng, *et al.*. Portable autocontrol solar photometer[J]. Chinese J Quantum Electronics, 2001, 18(6): 551-555.  
詹杰,谭锟,邵石生,等. 便携式自动太阳辐射计[J]. 量子电子学报, 2001, 18(6): 551-555.
- Yuan Lin, Liu Bo, Wang Bangxin, *et al.*. Design of mobile 1064 nm Mie scattering lidar [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1721-1725.  
袁林,刘博,王邦新,等. 车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达的研制[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1721-1725.
- Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 203-208.  
伯广宇,刘东,王邦新,等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 203-208.
- Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun, *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 21(8): 1012-1015.  
吴永华,胡欢陵,周军,等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 1012-1015.
- Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing, *et al.*. Analysis and determination of lidar geometrical factor[J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 147-150.  
汪少林,曹开法,胡顺星,等. 对激光雷达几何因子的分析与测量[J]. 激光技术, 2008, 32(2): 147-150.
- Shi Guangyu, Xu Li, Guo Jiandong, *et al.*. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1996, 20(4): 401-407.  
石广玉,许黎,郭建东,等. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测[J]. 大气科学, 1996, 20(4): 401-407.
- 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.
- J E Barnes, N Sharma, T B Kaplan. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. Appl Opt, 2007, 46(15): 2922-2929.
- Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics [M]. Hefei: Meteorological Press, 1990. 42-43.  
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 合肥: 气象出版社, 1990. 42-43.
- 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.
- K N Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- 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.
- Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Yingjian, *et al.*. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0901001.  
孟祥谦,胡顺星,王英俭,等. 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[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0901001.
- Zhou Xiujie. 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.
- Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 597-601.  
胡顺星,胡欢陵,吴永华,等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 597-601.
- Mao Minjuan, Jiang Weimei, Wu Xiaoqing, *et al.*. Lidar exploring of the UBL in downtown of the Nanjing city[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(10): 1723-1728.  
毛敏娟,蒋维楣,吴晓庆,等. 气象激光雷达的城市边界层探测[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1723-1728.