

基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测

史 博¹ 陶宗明^{1,2*} 麻晓敏¹ 单会会¹ 赵素贵¹ 刘 东² 谢晨波²

¹解放军陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031

²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 气溶胶是大气中污染物PM_{2.5}和灰霾的主要成分,近地面的气溶胶直接影响人们的生活和生产。利用电荷耦合器件(CCD)侧向散射激光雷达系统和相应的反演方法,对探测到的数据进行处理和分析。与后向散射激光雷达对比,验证了CCD侧向散射激光雷达探测结果的正确性。分析了2014年4月合肥西区董铺岛3 km高度范围内气溶胶后向散射系数的特点:随时间和高度变化;天气晴好时,地面上后向散射系数与地面站PM_{2.5}质量浓度成正比;紧贴地面有一层较厚气溶胶。实验探测结果表明基于CCD的侧向散射激光雷达是探测近地面气溶胶浓度的一种有效的新方法。

关键词 大气光学;气溶胶后向散射系数;侧向散射激光雷达;电荷耦合器件;PM_{2.5}质量浓度

中图分类号 TN958.98; P407.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0501006

Measurements of Near-Ground Aerosol Backscattering Coefficient Profile with Side-Scatter Technique

Shi Bo¹ Tao Zongming^{1,2} Ma Xiaomin¹ Shan Huihui¹ Zhao Sugui¹ Liu Dong² Xie Chenbo²

¹Section of Physics Teaching and Research, Department of Basic Sciences,
Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

²Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Aerosol is the main part of atmospheric contamination PM_{2.5} and haze. Near-ground aerosol affects human living and production directly. Using side-scatter lidar system based on charge-coupled device (CCD) and the retrieval method, the acquired experimental data are processed and analyzed. The detection correctness of CCD side-scatter lidar system is validated by comparing with backscattering lidar system. The characteristics of aerosol backscattering coefficient at an altitude within 3 km in April 2014 at Dongpu Island, western suburb of Hefei are analyzed as changing with time and altitude, aerosol backscattering coefficient is linear to mass concentration of PM_{2.5} when the weather is fine, and aerosol concentration is comparatively large near ground. The experimental results show that side-scatter lidar system based on CCD is an effective new method of exploring the aerosol concentration near ground.

Key words atmospheric optics; aerosol backscattering coefficient; side-scatter lidar; charge-coupled device; PM_{2.5} mass concentration

OCIS codes 010.1310; 290.5820; 040.1520

1 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的直径为0.001~100 μm的固体和液体微粒共同组成的多相体系。大气

收稿日期: 2015-01-04; 收到修改稿日期: 2015-02-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41175021)

作者简介: 史 博(1982—),女,硕士,讲师,主要从事激光雷达技术、激光大气探测等方面的研究。E-mail: shibo1982_1982@126.com

*通信联系人。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

气溶胶在地球上的含量并不多,但大部分在与人类活动密切相关的对流层内,对人类环境和全球气候都有一定的影响^[1]。一方面,它是大气污染物PM2.5和灰霾的主要成分;另一方面,它在地球-大气辐射收支过程中扮演了重要的角色。

激光自20世纪60年代被发明以来,便很快被应用到大气探测中。目前,激光雷达已成为探测大气气溶胶的有力工具^[2-3]。后向散射激光雷达,由于发射光路和望远镜视场在近区内不完全重合,存在一个过渡区和盲区,使得气象、环境部门重点关注的近地面区域的数据误差较大,而无法准确获得近地面区域的气溶胶分布情况。侧向散射激光雷达是国际上正在研究的一种新技术,它将发射装置与接收装置分两处放置,接收侧向散射光,避免了后向散射激光雷达中几何因子的影响,虽然远距离段空间分辨率不好,但在近距离段测量精度大大提高,很适合用来测量近地面的大气气溶胶空间分布^[4-7]。

本文介绍了基于CCD的侧向散射激光雷达系统、侧向散射激光雷达原理和数据处理方法,并对2014年4月的探测结果进行了分析。

2 系统简介

本文数据采集所使用的侧向散射激光雷达系统由以下几个部分组成:激光器、电荷耦合器件(CCD)相机、几何标定装置和计算机。使用的激光器为Nd:YAG激光器,发射波长为532 nm,光脉冲频率为10 Hz。CCD相机的像素为3352 pixel×2532 pixel,且利用窄带滤光片减少背景辐射以提高信噪比。通过几何标定装置确定CCD相机中的像素与散射光束上各点的一一对应关系。CCD相机连接着计算机,将回波信号存储于计算机中。

该系统的主要工作原理为:激光器向大气中发射一束激光,光束与大气相互作用,则散射光中就包含了大气中气溶胶的信息;CCD相机中的像素记录散射光束上各点的散射光信号强度;通过后向散射激光雷达方程和侧向散射激光雷达方程反演得到光束上各点的气溶胶后向散射系数廓线。侧向散射激光雷达的光路示意图如图1所示,图中 z 为探测高度, D 为CCD相机到光束的垂直距离, θ 为散射角, $d\theta$ 为像素对应的张角^[8]。

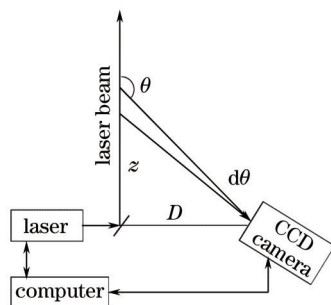


图1 侧向散射激光雷达光路示意图

Fig.1 Diagram of side-scatter lidar

3 数据处理方法

3.1 信号的提取方法

拍摄的CCD图像除了含有有用信号——气溶胶和大气分子的散射信号外,还包含背景光和干扰光。实验中,连续拍摄曝光时间相同的两张CCD图像,一次包含激光光束,另一次激光器关闭。将两次拍摄的图像对应像素信号相减,就可以消除背景光和干扰光。

消除背景光和干扰光后,CCD的图像中散射信号是一束较宽光柱,光束的宽度可能横跨多个像素。利用Matlab编程,对这多个像素信号进行高斯拟合^[9],从而转换为光束方向上该处散射光的总强度,至此完成信号的提取工作。

3.2 反演方法

侧向散射激光雷达方程与后向散射激光雷达有两点不同:大气透射率项;包含了气溶胶的相函数。因此,传统的Fernald反演方法不再适用。文献[10]探索了新的反演方法:

在探测范围内(水平方向上尺度 500 m),可假设大气在水平方向上是均匀的,则侧向散射激光雷达方程可写作

$$P(z, \theta) = \frac{P_0 KA}{D} \left[\frac{\beta_1(z, \pi)}{f_1(\pi)} f_1(\theta) + \frac{\beta_2(z, \pi)}{f_2(\pi)} f_2(\theta) \right] \exp[-\tau - \tau / \cos(\pi - \theta)] d\theta, \quad (1)$$

式中 $P(z, \theta)$ 为接收到的高度为 z 、散射角为 θ 处的能量, P_0 为激光雷达发射的能量, K 为校准常数, A 为望远镜的有效接收面积, $\beta(z, \pi)$ 是后向散射系数, $f(\theta)$ 为相函数, 下标 1 和 2 分别表示气溶胶和大气分子, 光学厚度 $\tau = \int_0^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] dz'$, $\alpha(z)$ 是消光系数。

若参考点 z_c (对应散射角为 θ_c) 处气溶胶的后向散射系数 $\beta_1(z_c, \pi)$ 已知, 则带衰减的侧向散射系数 $\beta'(z, \theta)$ 可变为

$$\beta'(z, \theta) = \left[\frac{\beta_1(z, \pi)}{f_1(\pi)} f_1(\theta) + \frac{\beta_2(z, \pi)}{f_2(\pi)} f_2(\theta) \right] \cdot \exp \left\{ -\left\{ \Delta\tau + \tau_c [1 / \cos(\pi - \theta) - 1 / \cos(\pi - \theta_c)] + \Delta\tau / \cos(\pi - \theta) \right\} \right\} d\theta, \quad (2)$$

式中 $\Delta\tau = \int_{z_c}^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] dz'$ 。

已知气溶胶相函数、消光后向散射比和参考点的气溶胶后向散射系数后, 根据(2)式, 气溶胶的消光系数和后向散射系数可逐点被反演出来。

3.3 对比实验检验

为了对侧向散射激光雷达反演结果的正确性进行检验, 设计了对比实验: 让侧向散射激光雷达和两台已标定过的后向散射激光雷达在同一地点同时进行探测, 侧向散射激光雷达和其中一台后向散射激光雷达工作在竖直方向上, 另一台后向散射激光雷达工作在水平方向上。将三台激光雷达同时同地点反演出的气溶胶后向散射系数进行对比。图 2 是三台激光雷达反演出的后向散射系数对比结果, 探测时间为 2014 年 4 月 10 日 00:20, 灰色曲线为侧向散射激光雷达反演出的气溶胶后向散射系数随高度变化的廓线(Clidar), 黑色曲线为工作在竖直方向上后向散射激光雷达反演出的气溶胶后向散射系数随高度变化的廓线(Vlidar), 黑色五角星表示工作在水平方向上(竖直高度为 0.08 km)后向散射激光雷达反演出的气溶胶后向散射系数。从图中可以看到: 1) 在 0.5~2.0 km 范围内, 灰色曲线和黑色曲线符合得非常好, 证明侧向散射激光雷达的反演结果在这一范围内是正确的; 2) 0.08 km 高度处, 黑色五角星落在灰色曲线上, 证明了这一高度上侧向散射激光雷达的反演结果也是正确的; 3) 高度大于 2.0 km 时, 灰色曲线和黑色曲线有一定的偏差, 这是由侧向散射激光雷达的信噪比和空间分辨率不够高所造成的; 4) 在 0.5 km 高度以下, 灰色曲线和黑色曲线偏差较大, 这是由后向散射激光雷达的几何因子所造成的。综合上述 1) 和 2) 两点, 可以得出在 2.0 km 高度以下, 侧向散射激光雷达反演出的气溶胶后向散射系数是正确的、可靠的。

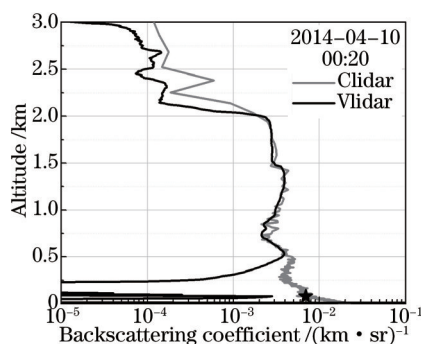


图 2 气溶胶后向散射系数对比检验

Fig.2 Comparison of aerosol backscattering coefficients

4 结果与分析

2014 年 4 月, 在合肥西郊用第 2 节所述侧向散射激光雷达和后向散射激光雷达对大气进行了 9 个晚上的同时探测。其中 4 月 1~2 日、4 月 13~14 日和 4 月 28~30 日的探测时间均为 19:30~22:30, 4 月 9~10 日的探测时间为 4 月 9 日 20:00~4 月 10 日 05:00。经过分析, 总结出以下几点结论:

1) 气溶胶后向散射系数在近地面的廓线是有结构的。

图3给出了4月份其中4天近地面气溶胶的后向散射系数廓线,时间都是20:30。从每一条廓线来看,近地面气溶胶后向散射系数在高度上并不均匀,而是有结构的,尤其是200 m以下的范围内,随着高度的增加气溶胶后向散射系数快速变小;从4条廓线的对比来看,每天同一时间的近地面气溶胶后向散射系数的廓线结构都是不同的。这些结果中紧贴地面的高度(如0.3 km以内)廓线是后向散射激光雷达无法给出的。

2) 气溶胶后向散射系数在近地面的廓线是随时间变化的。

图4为2014年4月9日20:00-23:50时间内近地面层气溶胶后向散射系数的时空分布图。从图4可以看到,气溶胶后向散射系数在近地面层的廓线不但是有结构的,而且也是随时间变化的,从另外几天的气溶胶后向散射系数时空分布图也得到了同样的结论。

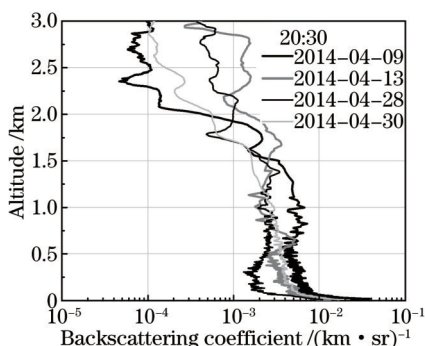


图3 4天同一时间(20:30)的近地面气溶胶后向散射系数廓线

Fig.3 Aerosol backscattering coefficients near ground at the same time (20:30) in 4 days

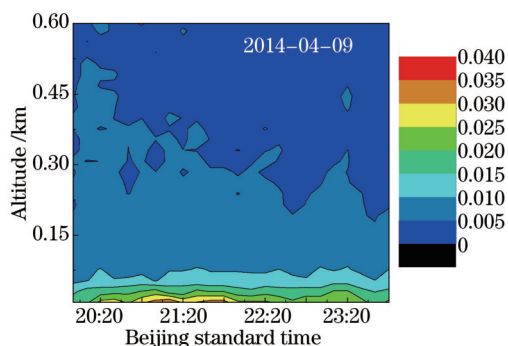


图4 2014年4月9日气溶胶后向散射系数时空分布图

Fig.4 Aerosol backscattering coefficient space-time distribution on April 9, 2014

3) 天气晴好时地面上后向散射系数与地面站PM2.5质量浓度是成正比的。

合肥市环保局在侧向散射激光雷达所在地(董铺岛)设有PM2.5质量浓度探测点,每小时给出一个地面PM2.5质量浓度数据。计算侧向散射激光雷达反演的气溶胶后向散射系数每小时的平均值,然后把地面上(取高度为15 m)的气溶胶后向散射系数值与PM2.5质量浓度值进行对比。2014年4月13日,天气晴朗,图5给出了该晚PM2.5质量浓度(单位为 mg/m^3)与气溶胶后向散射系数(单位为 $\text{km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)在每小时内平均值的对比结果,从图中可以看出:PM2.5质量浓度与气溶胶后向散射系数成正比,且当日比例系数为1.3。实验数据表明,在其他晴好天气,也具有与图5类似的正比关系。这说明了天气晴好时,地面上气溶胶后向散射系数与环保局给出的地面站PM2.5质量浓度是线性相关的,但PM2.5质量浓度探测仪只能布置在有限高度进行定点探测,不能给出PM2.5质量浓度随高度变化的廓线。由上述分析可知,当天气晴好时,将侧向散射激光雷达反演出的气溶胶后向散射系数廓线转化为同一时间的PM2.5质量浓度廓线是可行的。

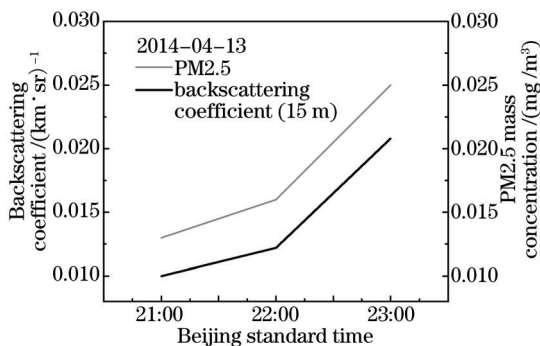


图5 PM2.5质量浓度与气溶胶后向散射系数对比图

Fig.5 Comparison of PM2.5 mass concentration and aerosol backscattering coefficient

在阴天的情况下,对比实验发现近地面(取高度为15 m)气溶胶后向散射系数与环保局给出的地面站PM2.5质量浓度是正相关的,但不是严格的正比关系。原因为阴天时大气中水汽含量高,后向散射系数受水汽的影响较大,而PM2.5质量浓度与水汽无关。在下一步的工作中,将会对水汽和气溶胶后向散射系数进行同时测量,将侧向散射激光雷达反演出的后向散射系数去掉水汽的影响,再与地面站PM2.5质量浓度进行对比,找出其规律。

4) 在紧贴地面有一层较厚的气溶胶。

由于天气晴好时近地面气溶胶后向散射系数与环保局给出的地面站PM_{2.5}质量浓度是成正比的,则天气晴好时的近地面气溶胶后向散射系数廓线可以反映近地面的PM_{2.5}质量浓度的高度分布关系。2014年4月28日是晴好天气,图6为该晚气溶胶后向散射系数的时空分布,从图中可以看出:近地面的气溶胶层厚度和浓度是随着时间变化的,20:30以后污染物浓度厚度明显增加,在21:30后紧贴地面层的气溶胶浓度开始增加。环保部门给出的激光雷达所在地同日PM_{2.5}质量浓度的变化情况如图7所示,很显然,图7中的质量浓度变化与图6是相符的。

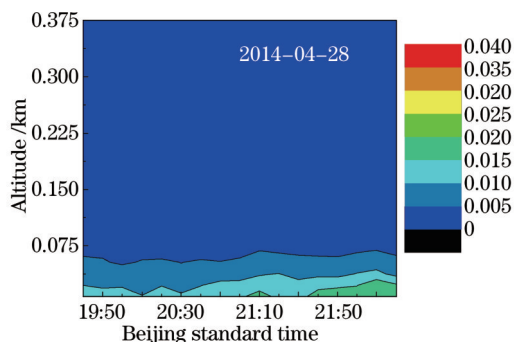


图6 2014年4月28日气溶胶后向散射系数时空分布图

Fig.6 Aerosol backscattering coefficient space-time distribution on April 28, 2014

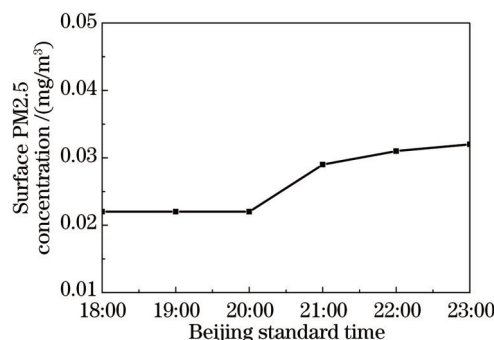


图7 2014年4月28日地面站PM_{2.5}质量浓度变化图

Fig.7 Surface PM_{2.5} concentration variation on April 28, 2014

5 结 论

利用建立的基于CCD的侧向散射激光雷达系统和探索出的气溶胶后向散射系数反演方法,绘制了气溶胶后向散射系数廓线及三维时空分布图。反演结果与后向散射激光雷达结果的对比说明了侧向散射激光雷达结果的正确性。通过分析2014年4月份合肥西区董铺岛3 km高度范围内气溶胶后向散射系数得出:近地面气溶胶后向散射系数随时间和高度而变化;天气晴好时地面上后向散射系数与地面站PM_{2.5}质量浓度是成正比的,而阴天时则不成正比;紧贴地面有较厚气溶胶层。探测实验结果表明基于CCD的侧向散射激光雷达是探测近地面气溶胶浓度的一种有效的新技术。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 C Weitkamp, Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere[M]. New York :Springer Science, 2005: 105-163.
- 3 D M Winker, J Pelon, M P McCormick, The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[J]. SPIE , 2003, 4893: 1-11.
- 4 Zongming Tao, Dong Liu, Zhenzhu Wang, *et al.*. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. Opt Express, 2014, 22(1): 1127-1134.
- 5 J E Bernes, 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.
- 6 J E Bernes, N C Parikh Sharma, T B Kaplan. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system[J]. Appl Opt, 2007, 46(15): 2922-2929.
- 7 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, *et al.*. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦,胡顺星,王珍珠,等. CCD激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801003.
- 8 Tao Zongming, Liu Dong, Ma Xiaomin, *et al.*. Development of side-scatter lidar system based on charge-coupled device and case study[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3282-3286.

- 陶宗明, 刘 东, 麻晓敏, 等. 基于 CCD 的侧向激光雷达系统研制及探测个例[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3282-3286.
- 9 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201001.
- 麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0401001.
- 10 Zongming Tao, Dong Liu, Chenbo Xie, *et al.*. A numerical inversion method for CCD side-scatter lidar[C]. International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2013, 31: 350-352.

栏目编辑: 史 敏