

利用 CCD 和后向散射激光雷达精确探测近地面 气溶胶消光系数廓线

陶宗明¹, 施奇兵², 谢晨波³, 刘东³, 张帅²

- (1. 陆军炮兵防空兵学院 基础部 物理教研室, 安徽 合肥 230031;
2. 合肥光博量子科技有限公司, 安徽 合肥 230031;
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 大气气溶胶主要分布在边界层内, 是大气污染的主要来源, 精确探测其在空间的分布(特别是近地面层), 具有重要的应用价值。后向散射激光雷达是探测大气气溶胶消光系数廓线的有力工具, 但由于盲区和过渡区的存在, 后向散射激光雷达在近距离处探测不到信号或信号较弱。把 CCD 探测与后向散射激光雷达(包括米散射和拉曼散射)联合在一起, 就可以克服上述困难, 同时通过增加拉曼通道, 实现了大气气溶胶消光后向散射系数比(又称激光雷达比)的精确测量。为了验证 CCD 探测结果的正确性, 对 CCD 不同位置距离间的探测结果进行了比对、CCD 镜头不同焦距间的探测结果进行了比对, 约在 1.2 km 高度以下, 两者气溶胶消光系数的相对偏差都小于 3%, 表明两台 CCD 的探测结果一致性很好。探测个例表明近地面的气溶胶消光系数在空间上随高度分布是不均匀的; 在时间方面有时随时间增加而增加、有时随时间增加而减少。

关键词: 大气光学; 大气散射; 激光雷达; 消光系数

中图分类号: TN958.98; P407.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S106007

Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar

Tao Zongming¹, Shi Qibing², Xie Chenbo³, Liu Dong³, Zhang Shuai²

- (1. Section of Physics T&R, Department of Basic Sciences, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China;
2. Hefei GuangBo Quantum Science and Technology Limited Company, Hefei 230031, China;
3. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Atmospheric aerosol, a main pollutant source, mainly exists in planetary boundary layer, and the precise detection of its vertical distribution, especially in the near ground, has an important application value. Backscattering lidar is a powerful tool for aerosol extinction coefficient profile detection, but no signals or only weak signals could be received in near distance because of the blind zones and transition regions. The above problems were resolved by combining CCD detection with backscattering lidar, and the aerosol extinction to backscattering coefficient (lidar ratio) was retrieved accurately with the combined

收稿日期: 2018-11-01; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(41475025)

作者简介: 陶宗明(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达研制和激光雷达大气探测方面的研究。Email: zmtao@aiofm.ac.cn

measurement of Raman scattering channel. In order to validate CCD detection, two different CCD lidars with different CCD position distance and focal length were designed respectively for comparison. The relative difference of aerosol extinction coefficients from two CCD lidars was less than 3% under about 1.2 km height, which indicates that the detection results are in good agreement. Case study shows that aerosol extinction coefficient near the ground is inhomogeneous with height, and sometimes increases with time and sometimes decreases.

Key words: atmospheric optics; atmospheric scattering; lidar; extinction coefficient

0 引言

大气气溶胶在全球气候变化、辐射传输、环境污染等方面扮演着十分重要的角色。一方面,大气气溶胶通过吸收和散射太阳辐射直接扰动地球大气系统的辐射平衡,产生所谓的直接气候效应^[1];另一方面,气溶胶粒子又可作为云的凝结核影响云的光学特性,云量以及云的寿命,产生所谓的间接效应^[2]。同时,大气气溶胶绝大部分分布在人们生活和工作的近地面大气边界层内,自身具有污染的特性,即它可以被人直接吸入呼吸道内而影响人体的身体健康,通过对太阳光消光作用(散射和吸收)而影响地面能见度。由于条件的限制,到目前为止,气溶胶从地面至边界层内时空分布廓线的探测数据还不充足。

20 世纪 60 年代激光被发明以来,激光技术一直被应用到大气探测中。后向散射激光雷达具有较高的时间和空间分辨率、较大的探测范围、较高的探测精度,其探测平台已呈现出多样化:地基、车载、机载和星载等。现今,后向散射激光雷达业已成为探测大气气溶胶的有力工具^[3-9]。但是,在后向散射激光雷达发射装置中,不管是同轴发射还是平行轴发射,接收信号在近距离段都存在过渡区和盲区,过渡区顶的高度由系统硬件及配置决定,一般在几百米的量级。在盲区内完全接收不到后向散射信号,在过渡区内后向散射光部分被接收到,这就限制了后向散射激光雷达在近距离探测场合的应用,特别是环境监测领域中的应用。基于 CCD 探测激光束成像的技术是一种新的探测技术^[10-14],它将发射光路和接收 CCD 分别放在两处,避免了后向散射激光雷达中过渡区和盲区的产生,在近距离段测量精度很高。把 CCD 探测和后向散射激光雷达联合在一起,可实现优势

互补。

文中先对探测系统进行简介;接着对这一方法进行了理论分析:后向散射激光雷达的几何因子成因、几何因子修正存在的问题、基于 CCD 的联合探测方法等;然后进行比对实验研究和个例探测展示;最后给出探测结果:气溶胶随高度分布是不均匀的,随着时间增加有时是增加的、有时是减少的。

1 探测装置

为了更精确地探测近地面的气溶胶消光系数廓线,采用 CCD 和望远镜两种方式同时接收激光束在大气中的散射光。532 nm 波长的激光束发射到大气中,望远镜接收到后向散射光后,分为 4 个通道(2 个拉曼散射接收通道和 2 个偏振散射接收通道)被光电倍增管探测、CCD 接收到侧向散射光、成像并记录光束上各处侧向散射光的辉度值。图 1 是探测装置的示意图,具体的硬件技术参数参见参考文献[15]。

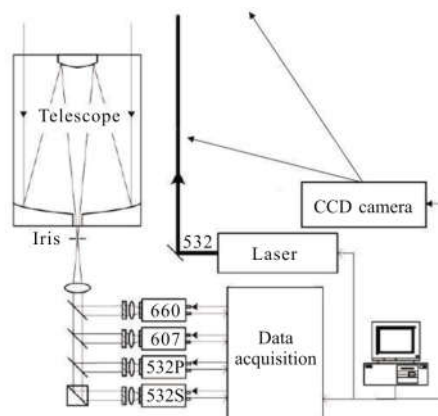


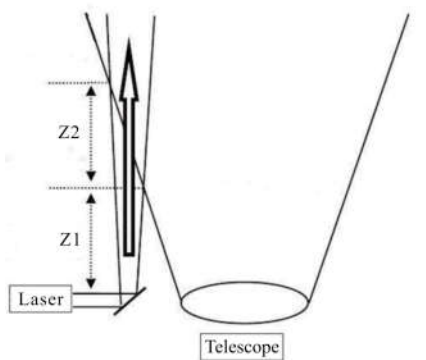
图 1 探测激光雷达系统示意图

Fig.1 Diagram of detection lidar system

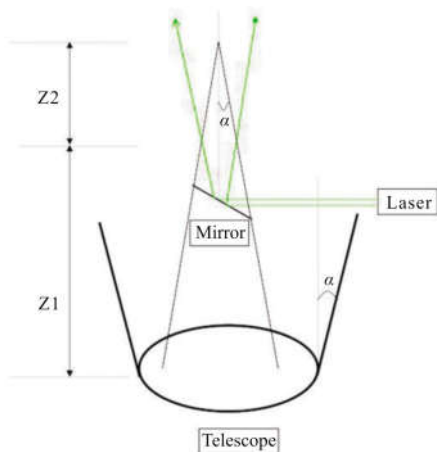
2 理论分析

2.1 激光雷达的几何因子成因

由于后向散射激光雷达发射和接收装置结构的特点,在近距离段有盲区和过渡区的存在。根据激光雷达发射光束与望远镜光轴的关系,可分为平行轴发射和同轴发射两种情况,分别如图 2(a)和图 2(b)所示。对于平行轴发射装置,可以明显地看出图中所示的盲区(Z1)和过渡区(Z2);对于同轴发射装置,同样有存在盲区和过渡区^[16]。图 2(b)中,α是望远镜的视场角,当望远镜光轴上一点到反射镜边缘的连线夹角也是α时,盲区(Z1)和过渡区(Z2)也就确定了,过渡区上方是充满区。



(a) 平行轴发射
(a) Parallel axis emission



(b) 同轴发射
(b) Same axis emission

图 2 几何因子示意图

Fig.2 Diagram of geometric factor

2.2 激光雷达的几何因子修正中的问题

激光雷达的几何因子用 $\eta(z)$ 来描述, $\eta(z)=0$ 为盲区、 $0 \leq \eta(z) \leq 1$ 为过渡区、 $\eta(z)=1$ 为充满区。几何因子 $\eta(z)$ 可以从理论上计算,也可以通过实验的方法来探测^[16-18]。用参考文献[17]的方法,测量出笔者实验室激光雷达系统的几何因子曲线 $\eta(z)$ 如图 3 所示。从图 3 中可以看出,0.05 km 之前为盲区,0.05~0.6 km 之间为过渡区,0.6 km 之后为充满区。过渡区中几何因子 $\eta(z)$ 随距离增大而增加,如 0.1 km 处的几何因子 $\eta(z) \approx 0.01$,0.15 km 的几何因子 $\eta(z) \approx 0.1$ 。一旦知道激光雷达的几何因子 $\eta(z)$,就可以对近距离原始信号进行修正,改善近距离的探测结果。

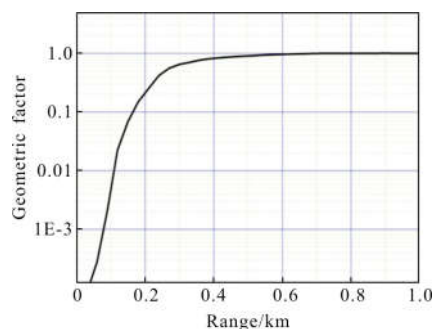


图 3 激光雷达系统几何因子曲线

Fig.3 Geometric factor curve of a lidar system

后向散射激光雷达方程可表示为:

$$P(z) = \frac{CE\eta(z)[\beta_1(z) + \beta_2(z)]}{z^2} \exp\{-2 \int_0^z [\alpha_1(z) + \alpha_2(z)] dz\} \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 为激光雷达接收到 z 处大气后向散射回波信号; C 为雷达系统常数; E 为发射激光的能量; $\eta(z)$ 为几何因子; $\beta_1(z)$ 和 $\beta_2(z)$ 分别表示 z 处大气分子和气溶胶的后向散射系数; $\alpha_1(z)$ 和 $\alpha_2(z)$ 分别表示 z 处大气分子和气溶胶的消光系数。

几何因子修正后的激光雷达信号为:

$$P'(z) = P(z) / \eta(z) = \frac{CE[\beta_1(z) + \beta_2(z)]}{z^2} \exp\{-2 \int_0^z [\alpha_1(z) + \alpha_2(z)] dz\} \quad (2)$$

从公式(2)中可知,若几何因子 $\eta(z)$ 值很小,则修正前后激光雷达的信号变化很大。在探测几何因子 $\eta(z)$ 过程中, $\eta(z)$ 越小时其误差就越大。这就是说, $\eta(z)$ 越小,修正后的信号误差越大。图 4 是根据 2018 年 2 月 28 日 20:00 时探测数据的反演出的气溶胶消光系数廓线,黑色线为后向散射激光雷达几

何因子修正前反演出的气溶胶消光系数廓线,红色线为后向散射激光雷达几何因子修正后反演出的气溶胶消光系数廓线,绿色线为 CCD 探测反演出的消光系数廓线,绿色线的结果可认为是气溶胶真实的消光系数廓线,理由在下面 2.3 节再介绍。

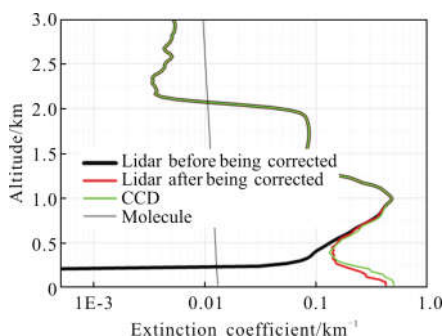


图 4 几何因子修正比对

Fig.4 Comparison of correction by geometric factor

从后向散射激光雷达几何因子修正后反演出的结果与 CCD 的探测反演出的结果比对可以看出,不同高度上修正效果是不一样的,高度越低,几何因子越小,修正后的误差越大,这与上面的理论分析是一致的。这就是说,后向散射激光雷达的几何因子可以修正,但修正后有误差存在,且探测距离越短误差越大。

2.3 基于 CCD 的联合探测方法

把 CCD 探测与后向散射激光雷达探测联合在一起,进行优势互补,可以精确地探测近地面的气溶胶消光系数廓线。从公式(1)的散射信号反演气溶胶消光系数有 3 个困难要解决:一是消除激光雷达系统的常数 C ;二是假设气溶胶消光后向散射系数比(又称激光雷达比);三是存在近地面的盲区和过渡区。长期的气球探测表明,对流层顶附近存在气溶胶清洁区,在清洁区内可合理认为只有分子的散射,故可利用这一高度上的激光雷达信号进行标定,以消除激光雷达系统常数 C 。后向散射激光雷达中的拉曼通道,可直接反演出气溶胶的激光雷达比。CCD 相机镜头的张角决定着 CCD 探测的角范围,这个张角是由 CCD 尺寸和镜头焦距共同决定的,文中实验所选用的 CCD 张角都小于 10° 。由于后向散射激光雷达在近地面有盲区和过渡区,故可用 CCD 对近地面段进行探测,弥补这一不足。联合探测具体工作方式是:首先由后向散射激光雷达中的拉曼通道信号独立反演气溶胶的激光雷达比;然后利用后向散射

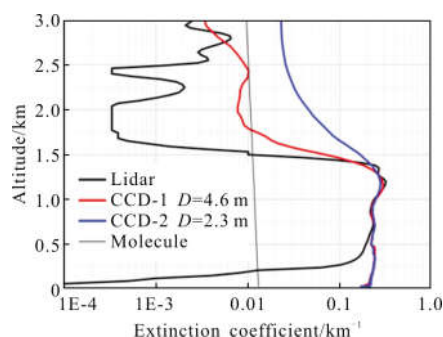
激光雷达中的偏振散射通道找出对流层顶附近的气溶胶清洁点,以消除激光雷达方程中的系统常数 C ;用 CCD 通道信号替代后向散射激光雷达近地面段的信号^[10],这样就圆满解决了上述 3 个困难。

3 实验

3.1 比对实验

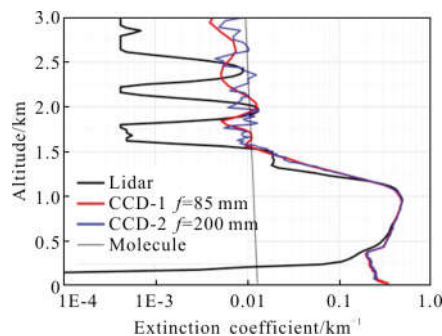
为了检验 CCD 探测结果的正确性,设计了一组不同参数的比对实验。笔者所在课题组的前期研究中,把 CCD 探测信号与竖直放置的后向散射激光雷达信号和水平放置的激光雷达信号分别进行过比对,一致性很好^[12]。文中两台 CCD 放置在离光束不同的距离上和选用不同焦距的镜头再进行比对。

2017 年 9 月 14 日晚,天气晴朗,两台 CCD 离激光光束距离分别为 4.6 m 和 2.3 m,但焦距都是 85 mm,图 5(a)为当天晚 20:00 探测的比对结果。2018 年 8 月 10 日晚,天气晴朗,两台 CCD 离激光光束距离相同,都是 4.6 m,CCD 镜头焦距分别为 85 mm 和 200 mm,图 5(b)是当天晚 21:30 探测的比对结果。图 5(c)是



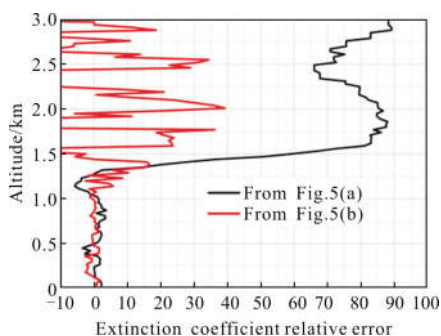
(a) 两台不同放置距离的 CCD 比对

(a) Comparison of two CCD with different distance



(b) 两台不同焦距镜头的 CCD 比对

(b) Comparison of two CCD with different focal length



(c) 相对偏差
(c) Relative error

图 5 不同探测参数结果比对和相对偏差

Fig.5 Comparison of different detection parameters and relative error

以上两天中两台 CCD 反演出的气溶胶消光系数的相对偏差,从图中可以看出,在 1.2 km 高度以下,两台 CCD 反演出的气溶胶消光系数相对偏差小于 3%,可近似看成是一致的。1.2 km 高度以上,相对偏差随高度增加而增加,这是由于 CCD 信号的信噪比随高度增加而减小所引起的。

3.2 个例探测

激光雷达联合探测系统自 2016 年建立以来,在大多数晴好天气夜晚和少数白天进行了探测实验,积累了大量的探测数据,下面给出一些探测结果个例。在文中的探测实验中,激光雷达廓线是 2 000 个脉冲探测后的平均结果,CCD 的曝光时间是 10 s。

后向散射激光雷达由于结构关系,很难准确探测到大气气溶胶在贴近地面高度上(如 200 m 以内)的廓线。在联合探测反演过程中,笔者等发现近地面的气溶胶廓线垂直结构丰富,随时间变化也有多种情况:有时是廓线的形状随时间在变化、有时是廓线形状随时间被拉伸或压缩、有时是廓线的数值随时间变大或变小。

图 6(a)是 2018 年 7 月 23 日 21:25 的气溶胶消光系数探测结果,从图中明显看出在 200 m 高度范围内,气溶胶在空间上有锯齿形的结构。图 6(b)是 2018 年 7 月 17 日 20:40 的气溶胶消光系数探测结果,从图中明显看出在 1.5 km 高度范围内,气溶胶有多层的结构。

2017 年 5 月 9 日傍晚~2017 年 5 月 10 日早晨是晴朗的天气,温度在 23~16℃之间变化,西北风 3~4 级。图 7(a)是气溶胶消光系数探测结果的时空演

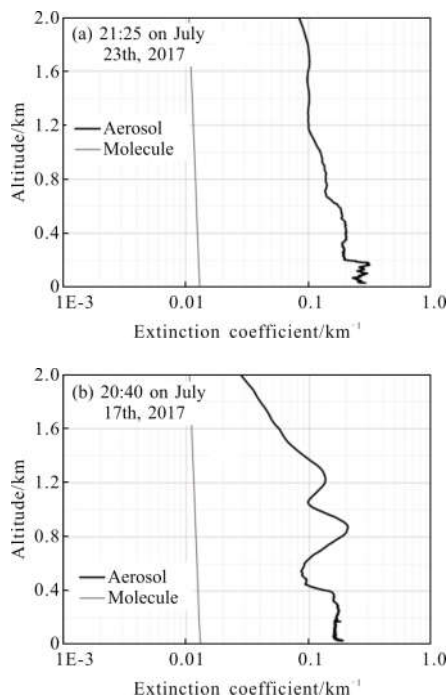
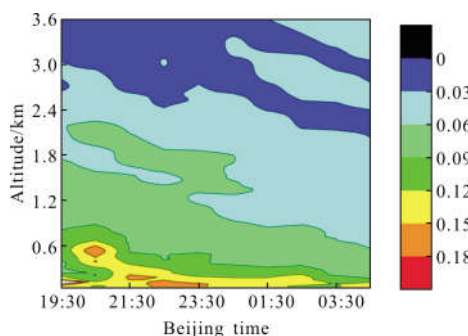


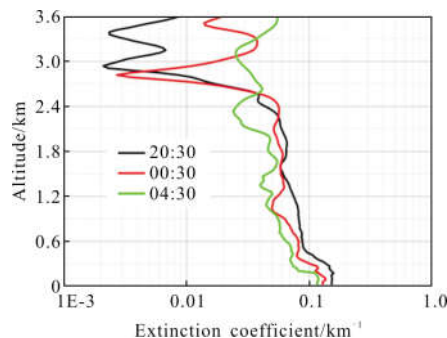
图 6 气溶胶消光系数的廓线

Fig.6 Profile of aerosol extinction coefficient



(a) 气溶胶消光系数时空演化图

(a) Time-altitude display of aerosol extinction coefficient



(b) 3 个气溶胶消光系数廓线

(b) Three aerosol extinction coefficient profiles

图 7 2017 年 5 月 9 日~10 日探测结果

Fig.7 Detection result on May 9th to 10th, 2017

化图,从图中可以清楚看出随着时间的增加,气溶胶消光系数减小,各气溶胶层逐渐下沉的趋势。图7(b)分别是 3 个时间点探测到的气溶胶消光系数廓线,进一步展示在 0~2.4 km 高度范围内,消光系数廓线数值随时间逐渐变小的关系。

2018 年 1 月 17 日傍晚至 2018 年 1 月 17 日早晨是多云天气,温度在 10~3 °C 之间变化,东风小于 3 级,且从 2018 年 1 月 17 日凌晨 5:00 开始有雾出现。图 8(a)是气溶胶消光系数探测结果的时空演化图,从图中可以清楚看出随着时间的增加,气溶胶层浓度呈逐渐增大的趋势。图 8(b)是 3 个时间点探测到的气溶胶消光系数廓线,也进一步展现了气溶胶消光系数廓线数值随时间增加的关系。

图 7 和图 8 给出了两个气溶胶在近地面廓线数值随时间变化趋势相反的个例。这两个个例中气溶胶消光系数随时间的变化关系不同,可能是由于当天的天气状况不同所引起的。2017 年 5 月 9 日傍晚至次日早晨,是晴好天气,污染很小,地面的消光系数最大值小于 0.2 km^{-1} 。而 2018 年 1 月 17 日傍晚至次日早晨,则是多云天气,大气相对湿度较大,且凌晨 5:00 开始有大雾出现。这个晚上地面上的气溶胶消光系数很大,从 1 km^{-1} 增加至 4 km^{-1} 左右。

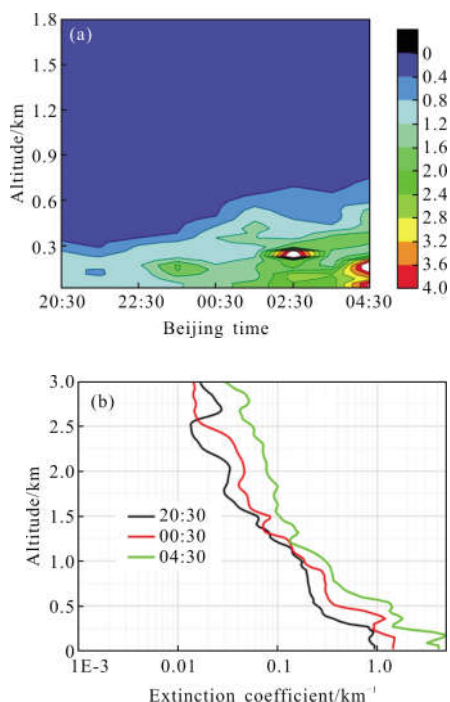


图 8 2018 年 1 月 17 日~18 日探测结果
Fig.8 Detection result on Jan. 17th to 18th, 2018

4 结 论

精确探测近地面的消光系数廓线无论是对大气科学研究,还是对污染的防控防治都是十分重要的,但要精确探测近地面的消光系数廓线不是一件容易的事。主要困难有两个方面,一是后向散射激光雷达的盲区和过渡区存在,二是激光雷达比值的获得。用 CCD 探测激光束成像,解决了盲区和过渡的问题;通过增加拉曼后向散射通道,反演时不需要假设,就可以直接反演出气溶胶的激光雷达比,故把 CCD 探测和后向散射激光雷达联合在一起,可实现近地面层气溶胶消光系数廓线的精准探测。CCD 成像探测是一种新技术,通过不同放置距离之间的比对、不同焦距镜头之间的比对,验证了 CCD 探测激光束成像的正确性。探测个例反演结果表明,近地面的气溶胶随高度分布是不均匀的,表明有丰富的垂直结构;同时近地面气溶胶消光系数在夜晚随时间而变化,有时随时间增加而增加、有时随时间增加而减少,反映了气溶胶浓度也在随时间变化的复杂性。基于 CCD 和激光雷达联合探测的方法可精确探测近地面的气溶胶分布,为进一步精细化研究近地面的气溶胶变化规律提供了有效的探测手段。

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. (in Chinese)
- [2] Shen Shaohua. The radiative heating characteristics in the cloudy and aerosol-laden atmospheres [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1991, 15(6): 89-98. (in Chinese)
- [3] Di Hui, Hou Xiaolong, Zhao Hu, et al. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 244206. (in Chinese)
- [4] Deng Pan, Zhang Tianshu, Chen Wei, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130003. (in Chinese)
- [5] Tao Zongming, Ma Xiaomin, Liu Dong, et al. The statistical distribution of PM_{2.5} mass concentration profiles at west suburb of Hefei city in 2014 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601001. (in Chinese)

- [6] Wang Shaolin, Xie Pinhua, Hu Shunxing, et al. Measurement of atmospheric boundary layer pollutants by mobile lidar in Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(3): 562–568. (in Chinese)
- [7] Winker D M, Pelon J, McCormick M P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosol and cloud [C]//SPIE, 2003, 4893: 1–11.
- [8] Ma Yingying, Gong Wei, Zhu Zhongmin. Aerosol optical characteristics in South east China determined using spaceborne lidar[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 707–714.
- [9] Zhao Ming, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130002. (in Chinese)
- [10] Bernes J E, Parikh Sharma N C, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(15): 2922–2929.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] Tao Z, Liu D, Wang Z, et al. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1127–1134.
- [13] Ma Xiaomin, Tao Zongming, Zhang Lulu, et al. Ground layer aerosol detection technology during daytime Based on side-scattering Lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401005. (in Chinese)
- [14] Bian Yuxuan, Zhao Chunshen, Xu Wanyun, et al. Method to retrieve the nocturnal aerosol optical depth with a CCD laser aerosol detective system [J]. *Optics Letters*, 2017, 43(22): 4607–4610.
- [15] Tao Zongming, Shan Huihui, Zhang Hui, et al. Development of lidar system based on one wavelength emission and five channel receiver [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1030002. (in Chinese)
- [16] Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing, et al. Analysis and determination of lidar geometrical factor [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 147–150. (in Chinese)
- [17] Wang Z, Tao Z, Liu D, et al. New experimental method for lidar overlap factor using a CCD side-scatter technique [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1749–1952.
- [18] Hu Shunxing, Wang Xiaobin, Wu Yonghua, et al. Geometric form factor determination with Raman backscattering signals [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1879–1881.