

基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度

陈莎莎^{1,2}, 徐青山¹, 徐赤东³, 余东升³, 陈小威^{1,2}

¹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;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³中国科学院合肥物质科学研究院医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031

摘要 基于微脉冲激光雷达测量数据,提出了利用气溶胶标高计算整层大气气溶胶光学厚度(AOD)的算法。首先利用激光雷达垂直和水平测量数据分别反演得到气溶胶垂直消光系数廓线和近地面水平方向的消光系数;然后将气溶胶垂直消光系数廓线分为 4 种类型,分别按照不同的方法拟合得到气溶胶标高;最后将气溶胶标高与近地面消光系数相结合,可得到整层大气 AOD。将计算结果与同一地区相同时刻太阳光度计的测量结果相比较,发现二者具有较好的一致性,平均相对误差不超过 6.7%。所提方法为白天少云和夜晚时段大气 AOD 的反演提供了一种新的技术手段。

关键词 大气光学;气溶胶光学厚度;气溶胶标高;激光雷达;太阳光度计

中图分类号 P407.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0701002

Calculation of Whole Atmospheric Aerosol Optical Depth Based on Micro-Pulse Lidar

Chen Shasha^{1,2}, Xu Qingshan¹, Xu Chidong³, Yu Dongsheng³, Chen Xiaowei^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract An algorithm is proposed to calculate the whole atmospheric aerosol optical depth (AOD) with aerosol scale height based on micro-pulse lidar data. Vertical extinction coefficient profiles and surface horizontal extinction coefficient of aerosol can be retrieved with the data vertically and horizontally measured by lidar. The vertical extinction coefficient profiles of aerosol are classified into four types, and different fitting methods are utilized to obtain aerosol scale height. Aerosol scale height is combined with surface extinction coefficient to calculate the whole atmospheric AOD. Comparison is made between the calculated results and those measured by sun-photometer in the same area simultaneously, and we find that the compared results show a good agreement. The average relative error is less than 6.7%. The proposed method provides a new technological means to calculate atmospheric AOD during the partly cloudy conditions and the night.

Key words atmospheric optics; aerosol optical depth; aerosol scale height; lidar; sun-photometer

OCIS codes 010.1290; 280.1100; 280.3640

1 引 言

气溶胶光学厚度(AOD)是反应大气浑浊度和气溶胶含量的一个重要物理量^[1]。目前,气溶胶的遥感探

收稿日期: 2017-01-13; 收到修改稿日期: 2017-03-08

基金项目: 气象专项课题(GYHY201106002-03)

作者简介: 陈莎莎(1991—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: css94493@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 徐青山(1965—),男,博士,研究员,主要从事大气探测、辐射传输、卫星遥感与图像大气校正方面的研究。

E-mail: qshxu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

测主要分为卫星遥感和地基遥感。卫星遥感可弥补环境恶劣的边远地区和广阔的海洋地区地基观测空间覆盖不足的缺陷^[2]。地基遥感的方法有很多,目前国内外应用较为成熟的是太阳光度计和激光雷达。太阳光度计的测量精度较高、稳定性较好,常作为其他仪器测量或遥感气溶胶光学特性的基准,但无法在太阳被云遮挡的时刻和夜间对大气进行测量。激光雷达作为一种主动遥感手段,实现了对气溶胶的连续观测,弥补了太阳光度计的不足^[3]。

激光雷达可进行高时空分辨率和高精度的连续观测,为气溶胶探测提供了有力的工具,在国内外得到了广泛的研究及应用^[4]。2000年美国国家航空航天局建立了全球微脉冲激光雷达网,用于监测云和气溶胶的垂直分布情况和光学特征^[5];此外,Sugimoto等^[6]建立的遍布东南亚多个国家和地区的激光雷达观测网、欧洲11国联合建立的激光雷达网^[7]以及亚洲激光雷达观测网(ACE-Asia)^[8],均为研究气溶胶的气象与气候效应提供了宝贵的资料。王珍珠等^[9]利用便携式米散射激光雷达研究了北京地区夏季边界层内气溶胶消光特性,指出气溶胶粒子主要集中在边界层内;Sasano等^[10-11]分析了激光雷达的观测结果,指出对流层气溶胶主要集中在3 km以下的高度,且对流层光学厚度是总光学厚度的主要部分。因此,目前激光雷达测量AOD的一般方法是先利用Fernald法求解得到气溶胶消光系数的高度分布^[12-14],然后对有限高度内消光系数求积分。然而利用该方法不能获得整层大气AOD,尤其在激光雷达有效探测距离较小时,利用这种方法计算整层大气AOD可能会带来较大误差。为此,本文提出了一种基于微脉冲激光雷达观测数据并利用气溶胶标高来计算整层大气AOD的方法。

气溶胶标高是反映气溶胶垂直分布的重要物理量。Qiu等^[15]指出气溶胶消光系数廓线的月平均、季平均或者年平均数据服从指数衰减;Penndorf^[16]在气溶胶消光系数廓线服从指数分布的情况下定义标高为消光系数衰减为地面1/e时的高度;王明星等^[17-19]的测量结果表明气溶胶消光系数廓线并非都按照指数形式单调下降;田文寿等^[20]研究了兰州地区气溶胶消光系数廓线的垂直分布,提出了除指数分布以外的均匀型和高斯型气溶胶消光系数廓线分布。因此气溶胶消光廓线并不都是服从指数衰减,直接按消光系数衰减为近地面1/e时的高度计算标高可能会带来较大的误差。

为此,本文在综合考虑前人研究结果和观测结果的基础上,将测量时段合肥地区的气溶胶垂直消光系数廓线分为4种类型,针对每种类型分别给出了标高的计算方法,并将得到的标高结合近地面的消光系数得到了整层大气气溶胶的光学厚度,最后将该方法获得的光学厚度与太阳光度计的测量数据进行了对比验证。

2 仪器介绍

为了研究合肥地区大气气溶胶的光学特性,实验采用微脉冲激光雷达和太阳光度计对大气进行探测。微脉冲激光雷达由激光发射单元、信号接受单元和信号处理单元构成。选用Nd:YAG激光器,系统的主要技术参量为:波长为532 nm,脉冲能量为30 μ J,脉冲持续时间为12 ns,重复频率为2500 Hz,光束直径为166 mm,光束发散角为50 μ rad,接收视场角为200 μ rad,滤波器带宽为0.3 nm。微脉冲激光雷达探测气溶胶的基本原理是激光发射单元向大气中发射脉冲激光束,由望远镜接收由大气中分子、气溶胶粒子产生的后向散射光,最后通过求解激光雷达方程得到气溶胶消光系数等参数。激光雷达方程可表示为^[12-14]

$$P(r) = Cr^{-2}\beta(r)T^2(r), \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 为距离为 r 处的雷达回波强度; C 为雷达系统常数,包括雷达的发射强度、透过率的衰减、接收系统的衰减和几何校正等; $\beta(r)$ 为大气的后向散射系数; $T(r) = \exp[-\int_0^r \sigma(r)dr]$ 为大气的透过率,其中 $\sigma(r)$ 为大气的消光系数。

作为对比,实验采用手持式五波段太阳光度计(型号Microtops II,公司Solar Light,美国)测量AOD,该仪器可测量440,500,870,936,1020 nm 5个波段气溶胶的光学厚度(光学厚度是根据Bouguer-Lambert-Beer定理得到的),具有准确度高、操作简单、携带方便等优点^[21]。

3 基本原理

气溶胶浓度因时空不同而不同,与人类活动、天气条件、季节等因素密切相关。由于地面污染源分布不均,一般高度越低,气溶胶均匀性越差。研究表明,气溶胶浓度随高度呈指数衰减,假设对流层气溶胶粒子的谱分布和化学组分不随高度变化,气溶胶粒子散射特性的变化仅由其数密度随高度的变化来决定^[22],则消光系数随高度的变化可表示为^[23-24]

$$\sigma_a(r, \lambda) = \sigma_a(0, \lambda) \exp(-r/H_a), \quad (2)$$

式中 $\sigma_a(r, \lambda)$ 为高度 r 处 λ 波段的气溶胶消光系数, $\sigma_a(0, \lambda)$ 为近地面的消光系数, H_a 为气溶胶标高。气溶胶标高的物理含义为假设气溶胶浓度随高度分布保持不变时气溶胶层的等效厚度,可反映气溶胶的垂直分布信息^[17-18],与研究区域颗粒物排放强度、边界层高度和气溶胶特性等因素相关。

AOD 是对某高度内消光系数的积分,整层大气气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 可表示为

$$\tau_a(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_a(r, \lambda) dr = \sigma_a(0, \lambda) H_a. \quad (3)$$

利用(3)式可计算得到整层大气气溶胶的光学厚度。很多研究人员都利用太阳光度计数据和近地面消光系数数据来计算气溶胶标高值^[23-25],但太阳光度计只能准确获得白天晴朗无云情况下的光学厚度,因此这种方法只能得到对应时段的气溶胶标高。本文根据微脉冲激光雷达测量数据反演得到气溶胶的标高,与太阳光度计相比,该方法可获得全天候气溶胶的标高。此外,根据得到的标高并利用(3)式可获取整层大气气溶胶的光学厚度值。

气溶胶标高的计算是建立在气溶胶垂直消光系数廓线基础上的,利用 Fernald 后向积分的方法对实验测量的回波信号进行处理,得到气溶胶垂直消光系数廓线,具体可表示为^[12-14]

$$\sigma_a(r) = \frac{X(r) \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \sigma_m(r') dr'\right]}{\frac{X(r_c)}{\sigma_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} X(r') \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \sigma_m(r'') dr''\right] dr'} - \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(r), \quad (4)$$

式中 $X(r) = P(r)r^2$ 为经过距离校正的回波强度; $\sigma_a(r)$ 、 $\sigma_m(r)$ 分别为气溶胶和大气分子在高度 r 处的消光系数; r_c 为标定高度,通常取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度,但微脉冲雷达很难达到这一高度,取 4~6 km 这一高度范围内 $X(r)/\beta_m(r)$ 最小值所在的高度为标定高度^[3],其中 $\beta_m(r)$ 为大气分子在高度 r 处的后向散射系数; $\sigma_a(r_c)$ 、 $\sigma_m(r_c)$ 分别为标定高度处的气溶胶和大气分子的消光系数; $S_a = \sigma_a(r)/\beta_a(r)$ 为气溶胶的消光散射比; $S_m = \sigma_m(r)/\beta_m(r) = 8\pi/3$ 为大气分子的消光散射比。气溶胶消光散射比与发射的激光波长、气溶胶粒子的尺度谱分布和折射指数等因素有关。研究表明,当激光器发射波长为 532 nm 时,对于背景期,中纬度对流层和平流层 S_a 可近似取为 50^[10,26-27]。

近地面消光系数是在假设水平方向大气均匀的情况下由斜率法计算获得的,具体可表示为^[13]

$$\ln[P(r)r^2] = \ln[C\beta(r)] - 2\sigma(r)r. \quad (5)$$

以 $\ln[P(r)r^2]$ 为纵坐标、 r 为横坐标,拟合得到一条直线,直线斜率的 $-1/2$ 为近地面的消光系数。

4 结果分析

选择 2016 年 5 月 12,16,19 日以及 2016 年 7 月 23~26 日晴朗无云时刻,利用手持式五波段太阳光度计和微脉冲激光雷达在合肥西郊进行实验。激光雷达的工作波长为 532 nm,太阳光度计无此波段数据,该波段的 AOD 值可通过光学厚度与波长的二次多项式关系得到^[28]。

4.1 气溶胶近地面消光系数

图 1 为利用斜率法得到的拟合结果,从图中可以得出该时刻的相关系数 $R = 0.917$,近地面的气溶胶消光系数为 0.264 km^{-1} ,其他测量时刻的近地面消光系数可按类似方法得到。近地面气溶胶消光系数一般与近地面层的气溶胶粒子有很大关系,能见度反映了这些低层气溶胶粒子的光学特性,因此能见度与近地面气

溶胶消光系数之间有一定的关系^[29]。图 2 为 2016 年 5 月 19 日利用激光雷达与能见度仪反演得到的近地面气溶胶消光系数的比较结果。从图中可以看出,利用激光雷达反演得到的结果与能见度仪得到的气溶胶消光系数的变化趋势基本一致,均方根误差(RMSE)为 0.028。

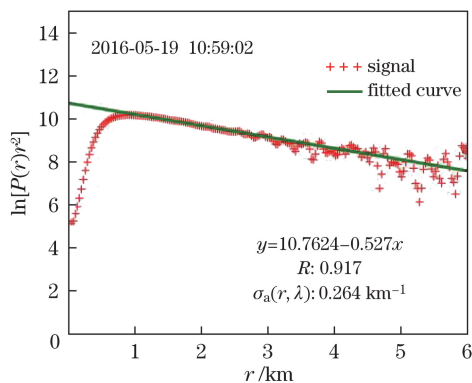


图 1 近地面消光系数

Fig. 1 Surface extinction coefficient

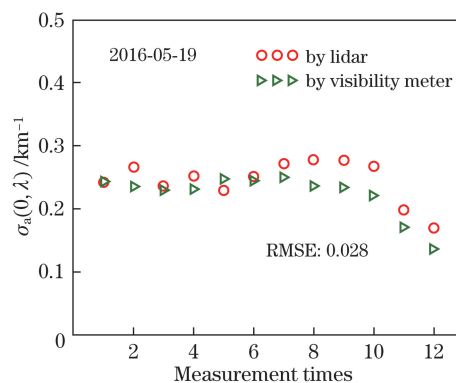


图 2 激光雷达和能见度仪得到的近地面气溶胶消光系数的对比

Fig. 2 Comparison of surface aerosol extinction coefficient obtained by lidar and visibility meter

4.2 气溶胶标高的分析计算

气溶胶标高的计算是建立在气溶胶消光系数廓线的基础之上的,首先利用 Fernald 后向积分的方法反演得到气溶胶垂直消光系数廓线,然后按照廓线的特点计算气溶胶标高。若气溶胶消光系数廓线随高度大致服从指数衰减,如图 3(a)所示,那么按照(2)式对气溶胶消光系数廓线进行指数拟合可得到标高,此为类型 1。但从观测结果来看,气溶胶消光系数廓线不全是服从指数衰减,还会出现如图 3(b)~(d) 3 种比较典型的类型,针对这 3 种情况给出了如下计算气溶胶标高的方法。

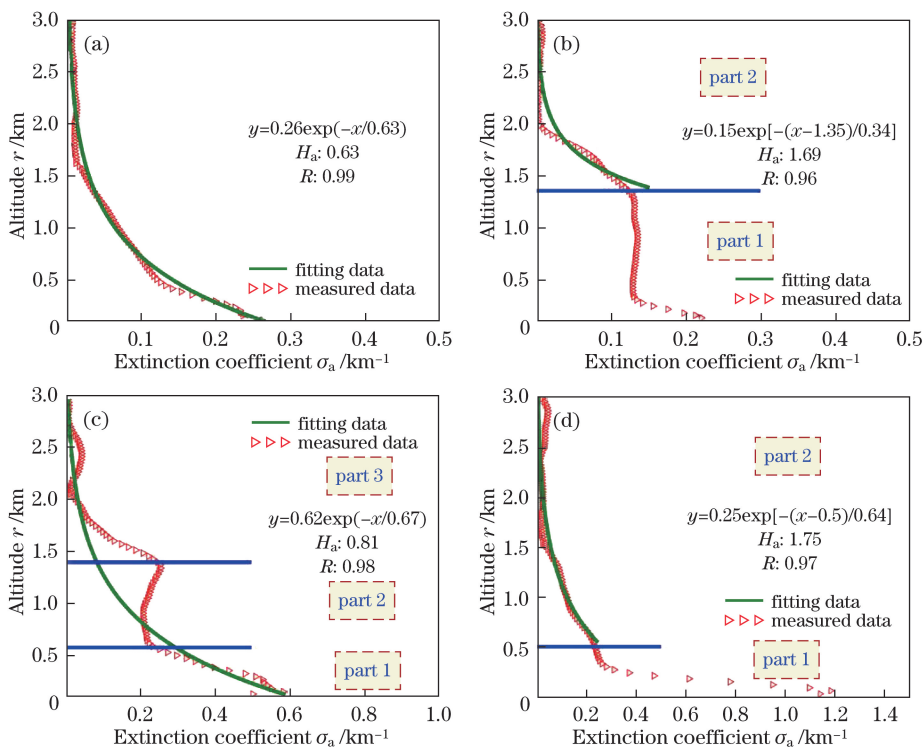


图 3 气溶胶垂直消光系数廓线的 4 种类型。(a)类型 1; (b)类型 2; (c)类型 3; (d)类型 4

Fig. 3 Four types of aerosol vertical extinction coefficient profile. (a) Type 1; (b) type 2; (c) type 3; (d) type 4

图 3(b)中气溶胶在边界层内充分混合,在边界层的上方近似呈指数衰减,消光系数可表示为

$$\sigma_a(r, \lambda) = \begin{cases} \sigma_a(0, \lambda), & r < H_1 \\ \sigma_a(H_1, \lambda) \exp[-(r - H_1)/H'_a], & r \geq H_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 H_1 为气溶胶在边界层内均匀混合的高度, H'_a 为对于消光系数随高度指数衰减部分拟合得到的标高, $\sigma_a(H_1, \lambda)$ 为拟合得到的在高度 H_1 处气溶胶的消光系数。对于这种情况,气溶胶标高的计算可分为两部分,即对 H_1 以上的部分进行指数拟合得到 H'_a ,再加上 H_1 便可得到标高,即 $H_a = H'_a + H_1$,从图中可以看出,对 H_1 以上部分拟合时相关系数 $R = 0.96$,该时刻气溶胶标高为 1.69 km,此为类型 2。

图 3(c)中,边界层内气溶胶混合不充分,在某一高度层内有积累,对于这种情况可将气溶胶消光系数简单表示为

$$\sigma_a(r, \lambda) = \begin{cases} \sigma_a(0, \lambda) \exp(-r/H_a), & r < H_1 \\ \sigma_a(r, \lambda), & H_1 \leq r < H_2 \\ \sigma_a(0, \lambda) \exp(-r/H'_a), & r \geq H_2 \end{cases} \quad (7)$$

因此 H_a 可表示为 $H_a = \frac{\int_{H_1}^{H_2} \sigma_a(r, \lambda) dr - \int_{H_1}^{H_2} \sigma_a(0, \lambda) \exp(-r/H'_a) dr}{\sigma_a(0, \lambda)} + H'_a$,即先将高度 H_1 以下和 H_2 以上部分进行指数拟合,得到 $\sigma_a(0, \lambda)$ 和 H'_a ,由于高度 H_1 和 H_2 之间气溶胶层的存在使整层大气 AOD 有所增加,增加的这部分光学厚度可用上式等号右边第一项的分子部分表示,再用这部分除以 $\sigma_a(0, \lambda)$,最后再加上 H'_a 就可得到标高。如图 3(c)所示,按照该方法拟合得到的标高为 0.81 km,此为类型 3。

由于近地面有轻度污染,近地面消光系数比较大,而高度 H_1 之上的气溶胶消光系数随高度呈指数衰减[图 3(d)],可将气溶胶消光系数廓线的变化曲线表示为

$$\sigma_a(r, \lambda) = \begin{cases} \sigma_a(r, \lambda), & r < H_1 \\ \sigma_a(H_1, \lambda) \exp[-(r - H_1)/H'_a], & r \geq H_1 \end{cases} \quad (8)$$

因此 H_a 可表示为 $H_a = [H'_a \sigma_a(H_1, \lambda) + \int_0^{H_1} \sigma_a(r, \lambda) dr] / \sigma_a(0, \lambda)$,即先将高度 H_1 以上的部分进行指数拟合得到 H'_a 和 $\sigma_a(H_1, \lambda)$,求出高度 H_1 以上气溶胶的光学厚度,即 $H'_a \sigma_a(H_1, \lambda)$,将 $H'_a \sigma_a(H_1, \lambda)$ 加上高度 H_1 以下的 AOD(即 $\int_0^{H_1} \sigma_a(r, \lambda) dr$)的总和除以计算得到的 $\sigma_a(0, \lambda)$,即可获得 H_a 。如图 3(d)所示,对高度 H_1 以上部分拟合得到的气溶胶相关系数为 0.97,气溶胶标高为 1.75 km,此为类型 4。

需要说明的是以上 4 种计算气溶胶标高的方法不适用于污染特别严重的情况,即上述方法中用于反演气溶胶垂直消光系数廓线的微脉冲激光雷达的有效探测高度应该在边界层以上。当火山爆发时,火山灰冲入平流层或其他原因造成平流层气溶胶积累时,该方法会带来较大的误差。

如图 4 所示,将 2016 年 5 月 12,16,19 日测量时刻按上述方法得到的标高与利用太阳光度计按照(3)式得到的标高进行了对比。图 4 采用双 X 轴的形式,图 4(a)中下面的 X 轴表示类型 1 的时间,上面的 X 轴表示类型 2 的时间;图 4(b)中下面的 X 轴表示类型 3 的时间,上面的 X 轴表示类型 4 的时间。2016 年 5 月 12 日上午 9:00—12:00 这一时段气溶胶扩散较强,不受阻挡,气溶胶消光系数廓线大体上服从指数衰减。图 4(a)中红色圈就是按照类型 1 直接进行指数拟合的结果,从图中也可以看出,随着太阳的升起,气溶胶标高有所增加,这是由于太阳辐射加速了气溶胶进入高空的热力条件,导致气溶胶标高有所上升。2016 年 5 月 16 日上午 8:30—10:00 这一时段内,在 1.5 km 左右的高度存在气溶胶层,按照类型 3 对这一时段内测量时刻气溶胶消光系数廓线进行分段拟合,得到的结果如图 4(b)中红色圈所示。从图中可以看出,该时段气溶胶标高仍有增加的趋势,但这一趋势并不明显,出现该现象的原因可能是这一时段内太阳辐射使得温度升高不明显,导致大气的对流和气溶胶的扩散也较慢。随着时间的推移,该气溶胶层慢慢消失,到下午 2:30 之后混合层内垂直对流较强,该混合层内气溶胶混合均匀,这种情况对应于类型 2,可按照类型 2 对应的方法计算标高,计算结果如图 4(a)中红色三角所示。由于下午时段天空中出现云层,因此有效测量数据较少。2016 年 5 月 19 日,近地面有轻度污染,可利用类型 4 提出的方法进行计算,结果如图 4(b)中红色三角所示。图 4 中绿色圈和三角是利用太阳光度计按照(3)式计算得到的结果,从图中可以看出,利用激光雷达与太阳光度计得到的标高相差不大,说明所提出的 4 种计算气溶胶标高的方法是可行的。

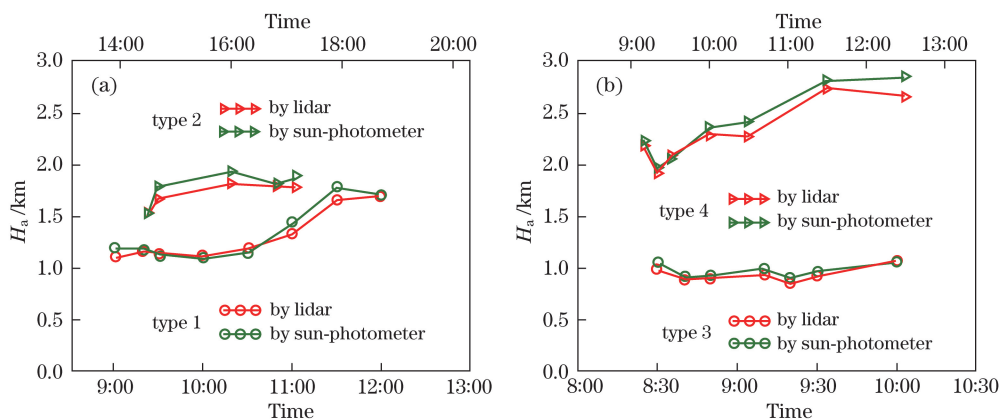


图 4 (a) 类型 1 和类型 2 对应方法得到的结果与太阳光度计得到标高的对比;
(b) 类型 3 和类型 4 对应方法得到的结果与太阳光度计得到标高的对比

Fig. 4 (a) Comparison of scale height obtained by methods corresponding to type 1 and type 2 with sun-photometer;
(b) comparison of scale height obtained by methods corresponding to type 3 and type 4 with sun-photometer

为了进一步验证按照 4 种类型计算气溶胶标高的可靠性,对 2016 年 7 月 24~26 日测量时刻的标高值进行了拟合,并与利用太阳光度计按照(3)式得到的标高进行了相关性分析,结果如图 5、6 所示,图 5 为对气溶胶消光系数廓线按照 4 种不同的类型进行拟合得到的结果,图 6 对利用两种不同的方法得到的标高进行了相关性分析,从图中可以看出两者之间的 $R=0.98$,具有较好的相关性。

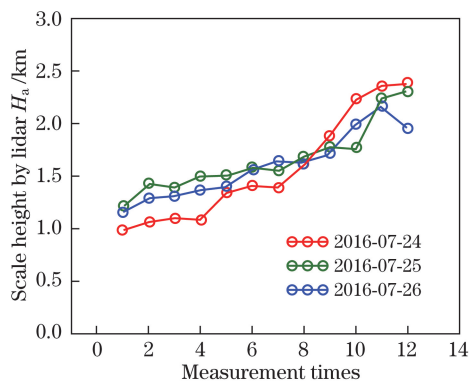


图 5 拟合得到的标高
Fig. 5 Fitted scale height

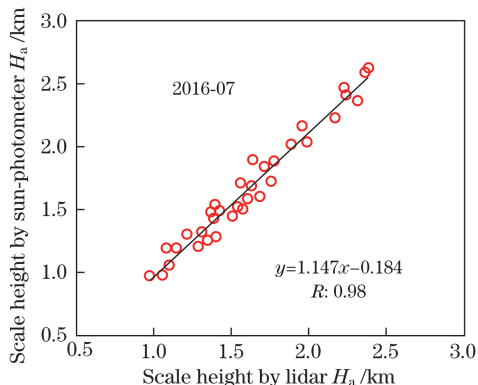


图 6 激光雷达与太阳光度计计算得到标高的对比结果
Fig. 6 Comparison of scale height obtained by lidar and sun-photometer

4.3 与太阳光度计测量得到的 AOD 进行对比分析

得到气溶胶近地面消光系数和标高之后,根据(3)式可以获得整层大气 AOD。图 7 给出了测量时刻利用微脉冲激光雷达计算得到的 AOD 与太阳光度计测量得到的结果之间的对比图,其中图 7(a)~(c)分别为 2016 年 5 月 12,16,19 日 3 天测量时刻的对比结果,图 7(d)~(f)分别为 2016 年 7 月 24~26 日的对比结果。从图中可以看出,利用气溶胶标高和近地面消光系数得到的结果与利用太阳光度计测量得到的结果相差不大,两者的变化趋势基本一致。表 1 给出了 6 天测量时刻两种方法之间的相对误差,可以看出两者的符合度较高,相对误差最大为 13.4%、最小为 0.3%,每天的平均误差不超过 6.7%,说明所提出的利用气溶胶标高计算整层大气 AOD 的方法是可行的。

在天空中存在薄云的情况下,利用微脉冲激光雷达计算 AOD 时,对云层所在高度范围内的气溶胶消光系数进行计算时,取与该时刻最临近的无云的前后两时刻的消光系数进行处理,将得到的结果作为该时刻云层所在高度范围内的消光系数,进而近似得到整层大气气溶胶的光学厚度。图 8 给出了 2016 年 7 月 23 日整点时刻激光雷达测量得到的 AOD,并将其与利用太阳光度计得到的结果进行对比验证,由于 14:00 之后天空中有薄云存在,因此只在 6:00—14:00 时段内利用激光雷达计算得到的 AOD 进行对比,

从图中可以看出太阳光度计的测量结果与激光雷达的计算结果相差不大,说明利用气溶胶标高计算整层大气 AOD 是可靠的。

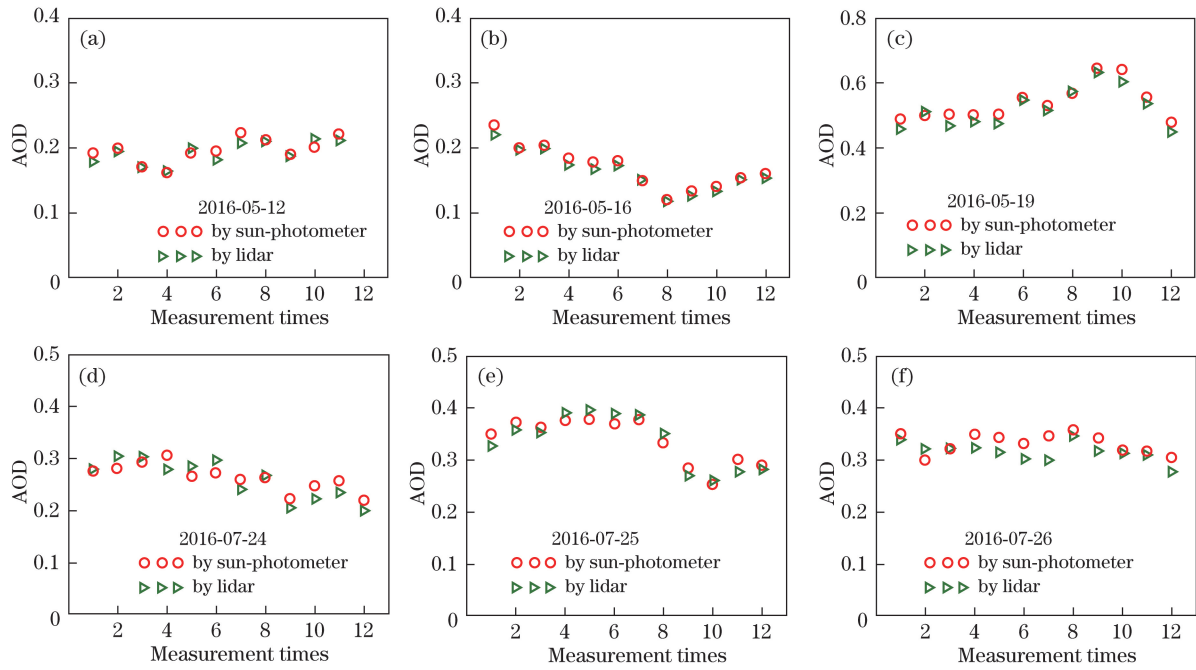


图 7 激光雷达与太阳光度计得到 AOD 的对比结果。(a) 2016-05-12; (b) 2016-05-16; (c) 2016-05-19; (d) 2016-07-24; (e) 2016-07-25; (f) 2016-07-26

Fig. 7 Comparison of AOD measured by lidar and sun-photometer. (a) 2016-05-12; (b) 2016-05-16; (c) 2016-05-19; (d) 2016-07-24; (e) 2016-07-25; (f) 2016-07-26

表 1 激光雷达与太阳光度计测量结果之间的相对误差

Table 1 Relative error of results measured by lidar and sun-photometer

Date	Relative error / %												Average relative error / %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2016-05-12	6.7	1.2	0.4	2.1	3.9	7.3	6.7	0.8	1.4	6.2	4.6	-	3.75
2016-05-16	5.9	2.2	2.0	6.1	6.2	4.3	1.0	0.4	6.4	6.0	0.7	5.0	3.86
2016-05-19	6.1	2.3	7.4	4.0	5.8	2.2	2.9	1.5	2.4	6.0	2.7	6.4	4.10
2016-07-24	1.1	8.7	4.1	9.0	6.9	9.2	6.3	1.7	6.6	9.7	8.7	8.8	6.70
2016-07-25	6.8	3.8	2.7	4.0	4.5	5.6	2.2	5.5	5.6	2.4	7.1	2.3	4.40
2016-07-26	3.3	7.0	0.3	7.0	8.6	8.8	13.4	3.1	6.6	2.0	2.8	9.6	6.00

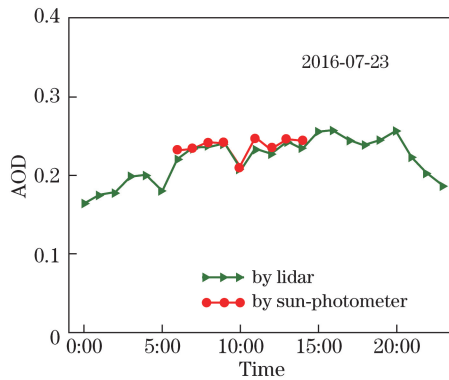


图 8 激光雷达和太阳光度计得到 AOD 的对比

Fig. 8 Comparison of AOD obtained by lidar and sun-photometer

5 结 论

提出了一种利用微脉冲激光雷达测量数据计算气溶胶标高与整层大气 AOD 的方法。基于气溶胶垂直消光系数廓线给出了 4 种计算气溶胶标高的方法,将该方法得到的结果与太阳光度计测量得到的结果进行了比较,验证了 4 种计算气溶胶标高方法的合理性。将拟合得到的标高结合近地面的消光系数得到整层大气气溶胶的光学厚度,并与太阳光度计测量得到的光学厚度相比较,得到二者的平均相对误差不超过 6.7%,一致性较好,说明所提出的方法是可行的。然而由于数据量有限,只验证了测量时段晴朗无云天气条件下的结果并证明了该方法的可行性,下一步将积累大量数据进一步验证该方法的可靠性,并统计该方法的误差。

参 考 文 献

- [1] Zhou Bi, Zhang Lei, Jiang Deming, *et al.* Analysis of aerosol optical depth over Lanzhou based on lidar measurement[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(4): 666-671.
周 碧, 张 镭, 蒋德明, 等. 利用激光雷达观测资料研究兰州气溶胶光学厚度[J]. *干旱气象*, 2013, 31(4): 666-671.
- [2] Chen Liangfu, Li Xinxin, Tao Jinhua, *et al.* Aerosol quantitative remote sensing inversion research and application[M]. Beijing: Science Press, 2011: 14-16.
陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 14-16.
- [3] Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi, *et al.* Optical properties of aerosol derived from lidar measurements[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 140-148.
周 军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, 15(2): 140-148.
- [4] Li Jun, Gong Wei, Mao Feiyue, *et al.* Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosol over Wuhan[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201001.
李 俊, 龚 威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201001.
- [5] Welton E J, Campbell J R, Spinhirne J D, *et al.* Global monitoring of clouds and aerosols using a network of micro-pulse lidar systems[C]. *SPIE*, 2001, 4153: 151-158.
- [6] Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, *et al.* Lidar network observations of tropospheric aerosols[C]. *SPIE*, 2008, 7153: 71530A.
- [7] Böckmann C, Wandinger U, Ansmann A, *et al.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project.2. Aerosol backscatter algorithms[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(4): 977-989.
- [8] Jin Lei. The retrievals of aerosol backscattering ratio from lidar data[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
靳 磊. 激光雷达数据反演气溶胶后向散射比研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [9] Wang Zhenzhu, Li Ju, Zhong Zhiqing, *et al.* Lidar exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 96-100.
王珍珠, 李 炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 96-100.
- [10] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(24): 4941-4952.
- [11] He Q S, Li C C, Mao J T, *et al.* Analysis of aerosol vertical distribution and variability in Hong Kong[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D14): D14211.
- [12] Song Xiuyu, Cao Nianwen, Yang Sipeng. Influence factors on atmospheric aerosol optical property inversion in Nanjing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040101.
宋秀瑜, 曹念文, 杨思鹏. 探究影响南京地区气溶胶光学特性反演的因素[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 040101.
- [13] Kunz G J, de Leeuw G. Inversion of lidar signals with the slope method[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3249-3256.
- [14] Fernald G F. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [15] Qiu J H, Zong X M, Zhang X Y. A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile[J]. *Aerosol Science*, 2005, 36(3): 361-371.
- [16] Penndorf R. The vertical distribution of Mie particles in the troposphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1954, 11(3): 245-247.
- [17] Wang Mingxing, Ren Lixin, Lü Weixiu, *et al.* Size distribution of atmospheric aerosol and its variation with height[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1984, 8(4): 435-442.

- 王明星, 任丽新, 吕位秀, 等. 大气气溶胶的粒度谱分布及其随高度的变化[J]. 大气科学, 1984, 8(4): 435-442.
- [18] Sun Hongping, Li Peiren, Shen Dongdong, *et al.* Aerosol vertical distribution characteristics and optical properties by aircraft measurements on Loess plateau[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2311-2322.
孙鸿娉, 李培仁, 申东东, 等. 山西地区气溶胶垂直分布特征与光学特性的飞机观测研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2311-2322.
- [19] Yang Ting, Li Jie, Wang Zifa, *et al.* Vertical distribution of the aerosol optical characteristics during the 2008 Beijing Olympic Games[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(5): 602-608.
杨 婷, 李 杰, 王自发, 等. 北京奥运会期间气溶胶光学特性垂直分布特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 602-608.
- [20] Tian Wenshou, Chen Changhe. Parameterization of optical characteristics of aerosols over Lanzhou city in winter[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1996, 20(2): 235-242.
田文寿, 陈长和. 兰州冬季气溶胶光学特性的参数化[J]. 大气科学, 1996, 20(2): 235-242.
- [21] Jiang Xiulan, Liu Yuguang, Liu Yahao, *et al.* Five channel hand-held sun photometer[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2007, 24(3): 54-58.
蒋秀兰, 刘玉光, 刘亚豪, 等. 手持式五波段太阳光度计[J]. 气象水文海洋仪器, 2007, 24(3): 54-58.
- [22] Ding Hongxing. Lidar observations of aerosol in troposphere in Suzhou[D]. Suzhou: Soochow University, 2004.
丁红星. 激光雷达对苏州城区对流层气溶胶的观测[D]. 苏州: 苏州大学, 2004.
- [23] Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian. Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(1): 33-37.
韩 永, 饶瑞中, 王英俭. 沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标高的比较分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 33-37.
- [24] Fan Wei, Han Yong, Wang Yi, *et al.* Analysis on aerosol scale height measured at inland and coastal zone[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 532-535.
范 伟, 韩 永, 王 毅, 等. 内陆和沿海地区大气气溶胶标高的测量分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 532-535.
- [25] Han Yong, Fan Wei, Rao Ruizhong, *et al.* Aerosol scale height of visible light-wave in experimentation study[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(1): 33-40.
韩 永, 范 伟, 饶瑞中, 等. 可见光波段气溶胶标高的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(1): 33-40.
- [26] Takamura T, Sasano Y, Hayasaka T. Tropospheric aerosol optical properties derived from lidar, sun photometer, and optical particle counter measurements[J]. Applied Optics, 1994, 33(30): 7132-7140.
- [27] Yuan Song, Xin Yu, Zhou Jun. Lidar observation of the lower atmosphere in Hefei[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(3): 387-395.
袁 松, 辛 雨, 周 军, 等. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 387-395.
- [28] Mélin F, Zibordi G, Djavidnia S. Development and validation of a technique for merging satellite derived aerosol optical depth from SeaWiFS and MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(4): 436-450.
- [29] Yan Fengqi, Hu Huanling, Zhou Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(7): 855-859.
阎逢旗, 胡欢陵, 周 军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚部的测量[J]. 光学学报, 2003, 23(7): 855-859.