

# 激光雷达探测气溶胶光学特性的不确定性因素研究

项衍<sup>1,2</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 张天舒<sup>1\*</sup>, 吕立慧<sup>1,2</sup>, 付毅宾<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 针对环境领域中最常用的米氏散射激光雷达,通过讨论气溶胶光学特性反演方法的流程,分析了影响反演结果准确度的各种不确定性因素。分析结果表明,为获取高稳定性和高可靠性的探测结果,需要采用合理的信号去噪方法,设置合理的累加次数、气溶胶消光后向散射比、标定高度和标定值等。此外,还需要对反演算法进行定期标定,主要包括几何重叠因子标定、球载消光仪标定、瑞利散射标定、能见度仪标定、太阳光度计标定、湿度标定、颗粒物浓度标定等。通过这一系列配置和标定后,多台激光雷达数据可以达到高度的一致性和准确性。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 气溶胶光学特性; 消光系数; 不确定性; 标定

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092801

## Uncertainty Factors of Aerosol Optical Properties Inversion by Lidar

Xiang Yan<sup>1,2</sup>, Liu Jianguo<sup>1</sup>, Zhang Tianshu<sup>1\*</sup>, Lü Lihui<sup>1,2</sup>, Fu Yibin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** For the most commonly used Mie scattering laser radar in the environmental field, through the process discussion of the inversion of aerosol optical characteristics, we analyze the uncertain factors which affect the accuracy of inversion results. The result shows that in order to obtain the results with high stability and reliable detection, the system use a reasonable signal denoising method to set up accumulative frequency, signal denoising method, aerosol extinction backscatter ratio, calibration height and calibration value. In addition, the system needs to calibrate the inversion algorithm regularly, including geometric overlap factor calibration, balloon borne extinction instrument calibration, Rayleigh scattering calibration, visibility meter calibration, sun photometer calibration, humidity calibration, particle concentration calibration and so on. With this series of configuration and calibration, multiple lidars data can achieve high consistency and accuracy.

**Key words** remote sensing; lidar; aerosol optical properties; extinction coefficient; uncertainties; calibration

**OCIS codes** 010.1290; 110.2970; 010.3640; 080.2720; 280.1350

## 1 引言

激光雷达探测系统是以激光为光源,通过收集激光与大气相互作用的辐射回波信号来遥感大气<sup>[1-2]</sup>。激光光束与大气中的相关介质发生相互作用,产生包含气体原子、分子和气溶胶粒子等有关信

息的辐射信号,结合不同的反演方法便可获取关于气体原子、分子和气溶胶粒子等的相关信息<sup>[3]</sup>。激光雷达主动遥感探测大气环境,具有很好的时间和空间分辨率,是大气环境有力的监测手段之一<sup>[4-6]</sup>。

激光雷达由于设备昂贵、技术性强等原因,早期主要应用于单点数据分析,近些年逐渐发展为城市

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-03-26; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0200401, 2017YFC0213002, DQGG0102)、国家科技支撑项目(2014BAC21B01)、国家自然科学基金(41305126, 41605020)、国家 973 计划(2014CB447900)

\* E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

或区域的组网联防联控监测。探测范围由二维发展到三维,探测技术从固定提升到走航,探测指标从单波长提高到多波长,探测对象由气溶胶、云、沙尘发展到气态污染物和风温、湿压等。从点式仪器拓展到采用距离分辨的遥测技术,激光雷达技术进一步提高了实时测量大气中任意路径上物理和化学性质的能力。

由于激光雷达类型众多,各生产厂家的型号规格不统一,缺乏判断数据质量的统一标准,因此本文针对环境领域最常用的米氏散射激光雷达,分析研究影响数据质量的主要不确定性因素与注意事项,并且通过实验数据来验证激光雷达的数据质量。

## 2 米氏散射激光雷达

用来探测大气中的气溶胶和云层信息的激光雷达技术一般以采用米氏散射探测技术为主,使用该技术的雷达系统被称为米氏散射激光雷达<sup>[7]</sup>。米氏散射激光雷达主要是利用大气气溶胶的后向散射回波信号来探测大气消光系数廓线和后向散射系数廓线的分布<sup>[8]</sup>。此类激光雷达的缺点是回波方程中含有后向散射系数和消光系数两个未知量,在求解消光系数的步骤中,需要提前假设散射系数和消光系数两者之间的关系<sup>[9]</sup>。米氏散射激光雷达是在大气环境及气溶胶相关的研究领域应用最广泛的激光雷达之一<sup>[10-13]</sup>。

图1给出了米氏散射激光雷达的系统结构图,激光雷达主要由4个子系统组成,分别为激光发射子系统、光学接收子系统、信号处理与控制子系统、数据反演子系统<sup>[14]</sup>。激光雷达工作原理为:通过发射子系统向空中发射激光脉冲,激光脉冲在大气中

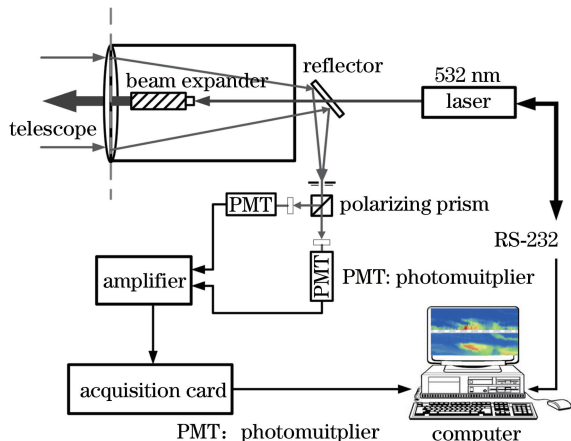


图1 激光雷达系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of lidar system

传播时与大气物质发生相互作用。望远镜接收激光脉冲与大气物质相互作用所产生的光回波信号,经信号检测得到探测大气的回波信号廓线,再经过数据反演算法处理,即可获取大气中相关的光学特性参数,如消光系数、后向散射系数、边界层高度、光学厚度、能见度、颗粒物质量浓度等信息。从误差来源来看,米氏散射激光雷达的测量误差主要来源于光机结构的影响、电子学的干扰和数据反演方法的不确定性。

## 3 激光雷达方程求解

米氏散射激光雷达发射的激光在大气中传输时,受到传输路径上大气气溶胶和空气分子消光的共同作用,信号被衰减,同时一部分被大气气溶胶和空气分子散射的激光沿原路径返回,并且再一次受到传输路径上大气气溶胶和空气分子消光的共同作用,信号再次被衰减,最终被激光雷达接收系统所接收。米氏散射激光雷达方程通常表示为<sup>[15-16]</sup>

$$P(z, \lambda) = \frac{K P_0(\lambda) A \Delta z}{z^2} [\beta_m(z, \lambda) + \beta_a(z, \lambda)] \times \exp\left\{-2 \int_{z_0}^z [\alpha_a(z, \lambda) + \alpha_m(z, \lambda)] dz\right\}, \quad (1)$$

式中: $P(z, \lambda)$ 为接收系统所接收到的高度为 $z$ 、波长为 $\lambda$ 处的回波信号功率; $K$ 为与激光雷达系统有关的校正常数; $P_0(\lambda)$ 为发射激光束的功率; $A$ 为接收望远镜的收光面积; $\beta_m(z, \lambda)$ 和 $\beta_a(z, \lambda)$ 分别表示空气分子和大气气溶胶的后向散射系数; $\alpha_m(z, \lambda)$ 和 $\alpha_a(z, \lambda)$ 分别为空气分子和大气气溶胶的消光系数; $z_0$ 为激光雷达所在的高度。

对于单波长的米氏散射激光雷达,常用的消光系数反演方法有斜率法、Klett法和Fernald法。斜率法必须事先假定大气气溶胶在水平上是均匀分布的<sup>[17]</sup>,Klett法将大气和气溶胶粒子合并在一个参量中,而Fernald法是Klett法的演变算法,Fernald法将大气分子和大气气溶胶粒子区别开来。众多研究证明Fernald方法是最稳定且最成熟的反演方法,其获取的结果准确率最高。

Fernald法认为粒子散射与消光系数成正比,即

$$S_a = \frac{\alpha_a(z_c)}{\beta_a(z_c)}, \quad (2)$$

$$S_m = \frac{\alpha_m(z_c)}{\beta_m(z_c)} = \frac{8\pi}{3}, \quad (3)$$

式中: $S_a$ 为大气气溶胶消光后向散射比(又称激光雷达比),数值一般在0到90之间; $S_m$ 为大气空气

分子消光后向散射比;  $z_c$  为标定高度。通常简单做法是选择一个固定的常数作为激光雷达比,即假定在垂直高度上大气气溶胶的尺度谱和化学组成不变,并且大气气溶胶粒子消光的变化仅仅是由粒子数密度的不同引起的<sup>[3]</sup>。 $S_m$  可根据美国标准大气模式提供的空气分子密度垂直廓线,再由分子瑞利散射理论计算得到<sup>[18]</sup>。

如果事先已知某一位置  $z_c$  处的空气分子和大

气气溶胶粒子消光系数比值(标定值),即可分段求出整条消光系数廓线<sup>[19]</sup>。标定高度通常选取几乎不含大气气溶胶的清洁大气层所在高度<sup>[20]</sup>。标定高度选择过高会造成选择位置的信噪比过低,影响数据反演;标高位置过低会由于气溶胶的存在,造成数据产生严重的偏差<sup>[21]</sup>。

利用后向积分求解标定高度  $z_c$  处以下的消光系数为

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(z) + \frac{P(z)z^2 \cdot \exp\left[2(S_a/S_m - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz'\right]}{P(z_c)z_c^2/\alpha_a(z_c) + S_a/S_m \alpha_m(z_c) + 2 \int_z^{z_c} P(z')z'^2 \exp\left[2(S_a/S_m - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz''\right] dz'}, \quad (4)$$

利用前向积分求解标定高度  $z_c$  处以上的消光系数为

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(z) + \frac{P(z)z^2 \cdot \exp\left[-2(S_a/S_m - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz'\right]}{P(z_c)z_c^2/\alpha_a(z_c) + S_a/S_m \alpha_m(z_c) - 2 \int_z^{z_c} P(z')z'^2 \exp\left[-2(S_a/S_m - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz''\right] dz'}. \quad (5)$$

在利用 Fernald 反演消光系数过程中,必须对激光雷达原始数据进行预处理,具体流程如图 2 所示,步骤为:

1) 解析原始数据。激光雷达信号处理系统是将接收系统收到的光信号转换成电信号,然后保存成二进制文件。不同的生产厂商保存的格式各不相同,常见的有欧洲 Licel 格式、气象 Netcdf 格式、十进制文件等。

2) 背景噪声扣除。指对周围杂散光可能产生的背景噪声进行扣除。一般背景噪声取 15 km 以上一段范围内的平均值,如 18~20 km 所有点的平均值作为背景。

3) 距离平方校正(PRR)。接收系统接收到激光雷达的回波信号,由于近场信号强,远程信号越来越弱,衰减率与距离高度平方成反比,因此需要对接收到的回报信号数据进行距离校正,校正方法为将各高度上的原始回波信号强度乘以该高度值的平方。

4) 信号去噪。激光雷达的信号去噪通常采取平均法和滤波法。平均法一般取几十至几百个脉冲进行平均,可以降低随机噪声,提高数据精度,但无

法消除远距离的噪声。在此基础上发展的滑动平均法和滤波对去除斑点噪声较为有效。

5) 几何重叠因子校正。由于激光雷达的收发系统的不同轴或其他光学系统的影响,望远镜在近场一定高度范围内只能接收到部分的回波信号,这给探测结果带来一定偏差,因此须对其进行修正,这个修正因子即几何重叠因子<sup>[22]</sup>。

## 4 结果与讨论

### 4.1 光机结构的影响

光机结构中最最重要的一个影响因素为激光雷达几何重叠因子,它依赖于激光发散角、接收视场和激光器与接收望远镜之间的距离等激光雷达系统本身的参数,通常用  $\eta$  表示,范围在 0~1 之间。激光雷达探测高度通常分为三个部分:离地面最近的一部分距离,因激光雷达无法接收到大气中的回波信号,这一段距离成为盲区,此时  $\eta=0$ ;超过一定距离后,望远镜开始接收到部分大气回波信号,这一区域称为激光雷达的过渡区,此时  $0<\eta<1$ ;随着高度的增加,激光光束与大气相互作用的信号被望远镜完全所接收,此时  $\eta=1$ 。

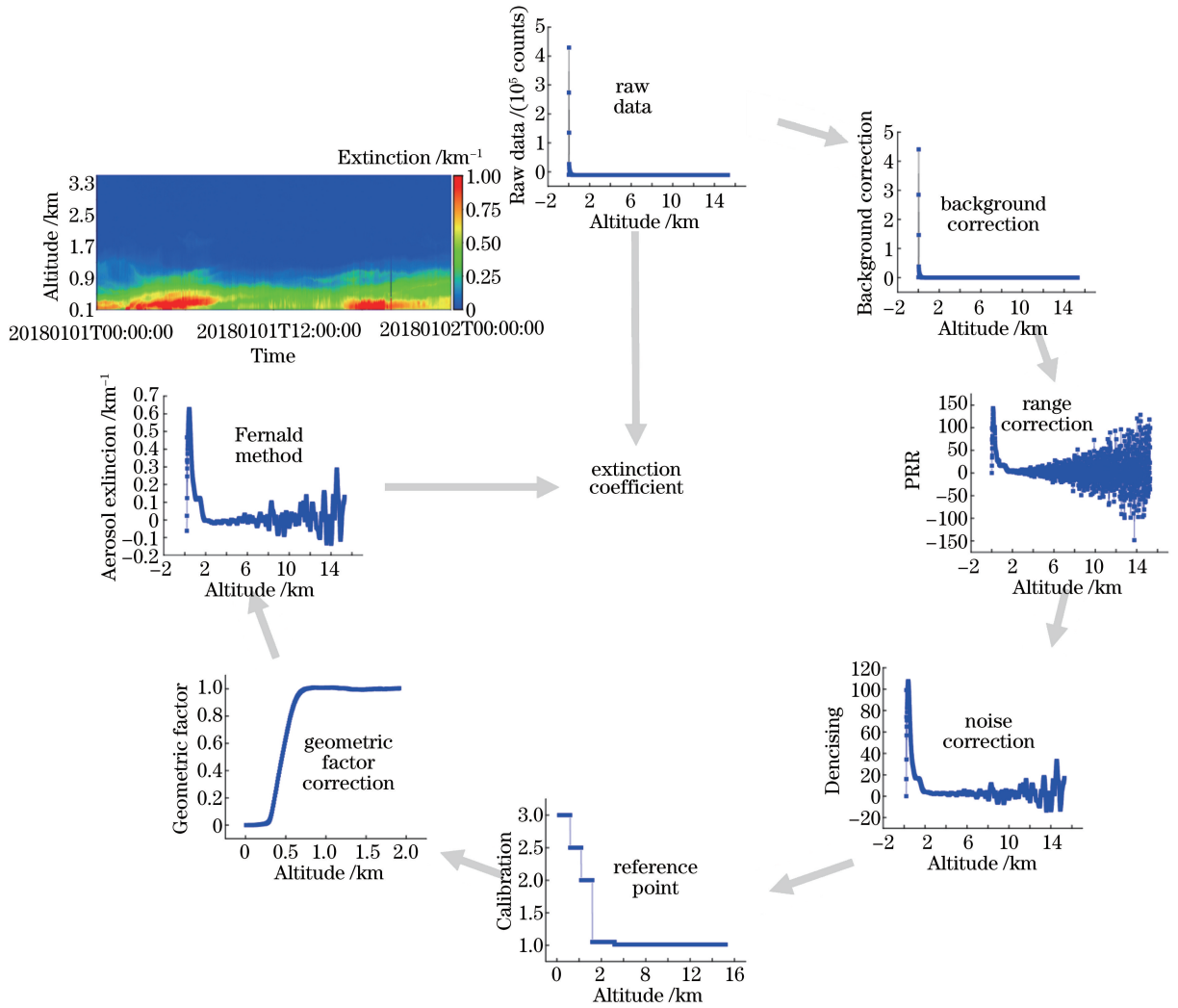


图2 消光系数反演流程图

Fig. 2 Flow chart of extinction coefficient inversion

实际上,几何重叠因子对于激光雷达而言是把“双刃剑”。一方面,过渡区内的激光雷达信号可以根据重叠因子进行修正,但修正必然会给实验数据带来一定的误差。另一方面,激光雷达系统的设计又可以利用合适的重叠因子来减小激光雷达接收信号的动态范围,增大接收视场角能极大地降低激光雷达重叠因子对信号的影响,但增大接收视场角会有更多的背景光噪声进入视场,减小了信噪比。因此每台激光雷达在出厂前需要进行合理的设计,以达到最优的匹配关系。

## 4.2 电子学的影响

### 4.2.1 信号采集方式

激光雷达接收到的回波信号主要由激光脉冲后向散射信号和多种噪声叠加而成,其中噪声主要包含信号本身的散粒噪声、电子学采样噪声、天空背景光噪声等。激光雷达电子学系统主要是对激光雷达

信号进行采集操作,目前激光雷达信号采集主要有以下三种方法:模拟法、光子计数法和模拟与光子计数融合方法。模拟法是利用模数转换器将光电探测器输出的信号转换成数字量,仅适用于相对较强的光信号;光子计数法是利用光电探测器输出的光子脉冲个数进行统计,仅适用于相对较弱的光信号。激光雷达近场信号强,而远场信号相对非常微弱。

因此采用模拟与光子计数融合方法来分别收集近场和远场信号,可满足激光雷达大动态范围的信号采集,极大提高激光雷达的探测性能。对于模拟法而言,需要设计噪声小、线性度高,而且增益系数可调的信号放大器。这样可以根据实际信号强度对输出信号幅值进行调节,从而获得更高的测量精度和信噪比。对于光子计数法而言,需要根据实际需求来选择合适的前置放大器和光子计数卡,特别是光电倍增管(PMT)的工作高压和光子计数卡的鉴别电平。



#### 4.2.2 采集累加次数

为了保证激光雷达采集到的原始数据具有足够的精度,通常在电子学子系统部分,进行足够多的累加采集,尽可能地减少噪声干扰引起的误差。此外,将每次采集结果进行平均处理,作为当前时间段的采集结果。图3给出了4种不同累加次数的原始回波信号的结果。可以看出,在 $2 \times 10^3$ 次的累加次数时,数据抖动比较大,12~14 km的背景信号在 $(-5.9 \pm 0.3) \times 10^{-4}$  mV内抖动,幅度超过0.5 mV;当进行 $2 \times 10^4$ 次以上的累加时,数据抖动较小,幅度在0.08 mV之内,数据抖动性减少了84%。 $2 \times 10^5$ 和 $2 \times 10^6$ 次的累加结果变化不大。因此在可接受的采集周期前提下,适当增加采集的累加次数可提高数据信噪比。

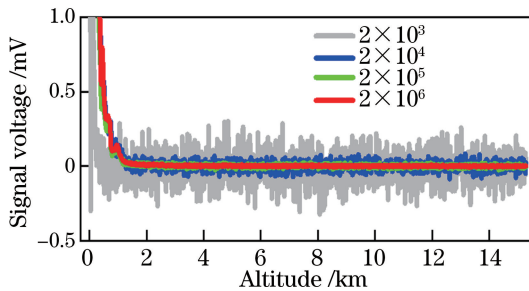


图3 不同累加次数下的原始回波信号

Fig. 3 Echo signals under different accumulation times

#### 4.3 反演算法的影响

反演算法过程中,存在较多误差来源。对于反演气溶胶消光系数,误差来源主要包括预处理过程中信号去噪的处理、激光雷达比的选择、标定高度和

标定值的设置;对于反演颗粒物浓度,误差来源主要包含缺乏水汽廓线、温度廓线、颗粒物廓线等数据的定期标定。此外,不正确的退偏通道增益比、光电倍增管标定不及时等也可造成颗粒物种类识别能力的下降。下面主要分析标定高度与激光雷达比的选取对算法反演结果的不确定度影响,讨论反演结果的几种常用标定手段。

##### 4.3.1 算法参数化方案设计

图4给出了532 nm激光雷达和630 nm消光仪对比观测的结果,图4(a)为激光雷达反演结果,图4(b)为汽艇悬浮在高空监测到的时间序列结果。两者均观测到在当地时间(LST)上午11点之前高空出现一层高消光带,污染较重,并且一直持续到下午日落前。两个仪器的一致性表明激光雷达系统和反演方法具有很好的可靠性和有效性。

为进一步分析系统测量精度及不确定性的影响因素,以反演算法中最核心的两个参数(参考点和激光雷达比)为研究目标,讨论两者不同设置方案对测量精度和不确定性影响。图5给出了激光雷达比选取在0~90 sr范围内,参考点选取在2.5~8.0 km范围,400 m高度处消光系数反演结果和汽艇在最接近的一个时间和高度上观测结果的对比分析,其中图5(a)为激光雷达和汽艇相关性的结果,相关系数为 $R$ ,图5(b)为方均根误差(RMSE)值。可以看出两者具有较高的一致性,最大为0.96,此时激光雷达比为47 sr,参考点高度为3.5 km,可以作为反演参数最优方案;同时参考点高度在3.5 km处时,激光雷达比在30~50 sr, RMSE值较小,仅不到0.1。

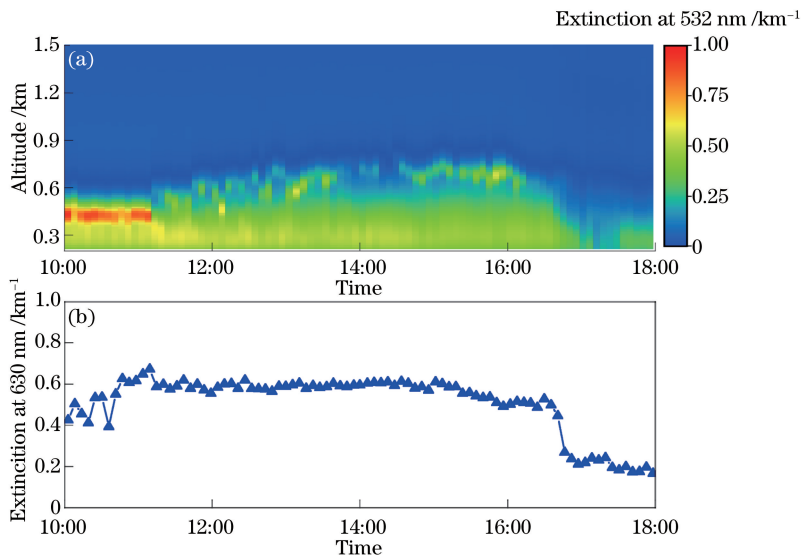


图4 消光系数随当地时间变化的结果对比。(a)激光雷达观测结果;(b)300 m汽艇观测结果

Fig. 4 Results comparison of extinction versus LST. (a) Observed by lidar; (b) observed by balloon at 300 m

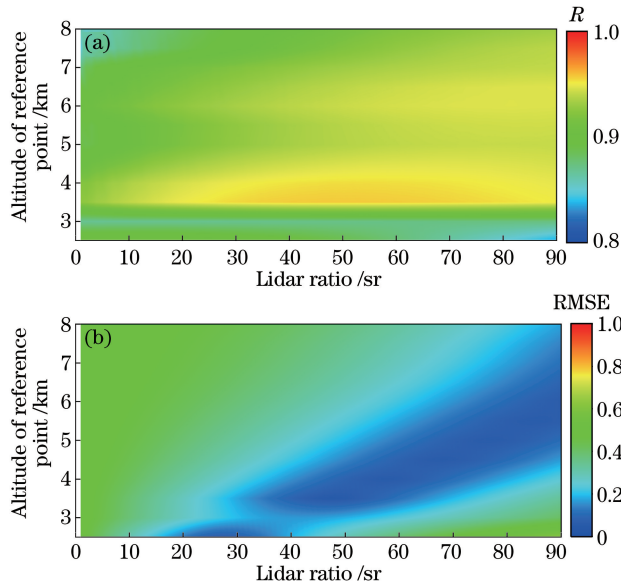


图5 激光雷达与汽艇观测结果对比。(a)相关性;(b)方均根误差

Fig. 5 Results comparison of lidar and balloon. (a) Correlation; (b) RMSE

#### 4.3.2 瑞利散射标定

在只考虑大气分子散射作用的条件下,激光雷达方程可改为

$$P(z, \lambda) = \frac{KP_0(\lambda)A\Delta z}{z^2} \beta_m(z, \lambda). \quad (6)$$

根据瑞利散射理论,每个空气分子的散射都是相同的,散射强度只与空气分子的数密度有关,推导出大气分子的散射强度为

$$\beta_m(z, \lambda) = \frac{8\pi^3(m^2 - 1)^2}{3N(z)\lambda^4}, \quad (7)$$

式中: $N(z)$ 为高度 $z$ 处空气分子数密度; $m$ 为空气分子折射率。将(7)式代入(6)式中可得到激光雷达回波信号强度为

$$P(z, \lambda)z^2 = KP_0(\lambda)A\Delta z \times \frac{8\pi^3(m^2 - 1)^2}{3N(z)\lambda^4}. \quad (8)$$

可以看出,在只考虑大气分子散射作用的条件下,激光雷达回波信号仅和空气分子数密度有关,结合理想气体状态方程和静力学方程,可以求出此时瑞利散射回波信号强度的估计值<sup>[23]</sup>,如图6所示。当同时考虑气溶胶作用时,完整的信号应在瑞利散射信号之上,若远场信号偏离瑞利散射信号过大,表示数据出现故障,需要查找故障原因。

#### 4.3.3 能见度仪标定

能见度仪可以获取当前点位的能见度, Koschmieder公式给出了能见度与大气消光系数之间的经验公式

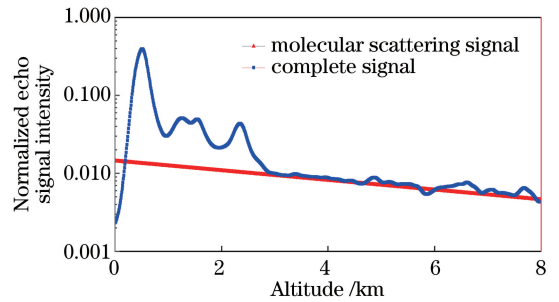


图6 瑞利散射信号标定

Fig. 6 Calibration of Rayleigh scattering

$$V_{\text{vis}} = 3.912/\alpha, \quad (9)$$

式中: $V_{\text{vis}}$ 为水平能见度; $\alpha$ 为白光的大气总消光系数,包括气溶胶散射消光、气溶胶吸收消光、分子散射消光、分子吸收消光<sup>[24]</sup>。因此,根据(9)式可得出近地面消光系数的标定值 $\alpha_1$ ,同时经过几何因子等校正后可得近地面的消光系数 $\alpha_2$ ,计算两者的偏差 $\Delta = \alpha_1 - \alpha_2$ ,将廓线整体平移 $\Delta$ 后可得到标定后的廓线。

#### 4.3.4 太阳光度计标定

使用太阳光度计对气溶胶的光学厚度(AOD)进行探测,常用的Langley方法给出了大气垂直总光学厚度的计算公式为<sup>[25]</sup>

$$\tau_\lambda = \frac{1}{m(\theta)} \ln \frac{V_{0\lambda}}{V_\lambda r^2}, \quad (10)$$

式中: $\tau_\lambda$ 为大气垂直总光学厚度; $m(\theta)$ 为大气光学质量,与天顶角 $\theta$ 有关; $V_{0\lambda}$ 为系统定标常数; $V_\lambda$ 为仪器采集到的输出电压; $r$ 为日地距离,单位为天文单位。而在激光雷达系统中,AOD被定义为大气消

光系数在一定垂直高度路径上面的积分<sup>[26]</sup>

$$\tau = \int_{z_1}^{z_2} \alpha_a dz, \quad (11)$$

式中： $\tau$  为气溶胶光学厚度； $z_1$ 、 $z_2$  为积分高度路径； $\alpha_a$  为气溶胶消光系数。在经过校正、标定等过程获取的大气气溶胶消光系数廓线的基础上，利用(11)式可得到标定后的气溶胶光学厚度。通过该值与太阳光度计遥测数据得到最接近波长的气溶胶光学厚度对比即可得到标定值，并进行误差分析。

#### 4.3.5 湿度和颗粒物浓度标定

利用激光雷达反演的消光系数可以转换成颗粒物质量浓度，而基于微量振荡天平 (TEOM) 的大气颗粒物自动监测仪收集到的颗粒物浓度由于存在高温烘干的过程，故其最终得到的颗粒物质量浓度为干颗粒的质量浓度。气溶胶粒子的散射吸湿增长因子  $f(S_{RH})$  可以用来表征不同相对湿度对气溶胶的影响程度，因此利用激光雷达反演的消光系数转换到颗粒物质量浓度必须要经过湿度修正，通过构建  $f(S_{RH})$  与相对湿度的经验关系式，将激光雷达测量的包含水分的湿消光系数，转换为干的颗粒物消光系数，在此基础上构建颗粒物消光系数与  $PM_{2.5}$  的经验关系式。相关文献指出，在相对湿度较低时，气溶胶粒子光散射能力变化缓慢；在相对湿度较高时，气溶胶粒子光散射能力会出现迅速增长<sup>[27]</sup>。经过湿度修正后的消光系数和质量浓度之间的关系相对简单，目前常用的有线性模型和指数模型<sup>[28]</sup>，同时考虑到颗粒物中组分等因素的变化，转换模型中的参数需要定期进行更新修正。

图 7 给出了未经湿度修正和经过湿度修正的消光系数转换到颗粒物质量浓度  $\rho$  结果对比，未经湿度修正的相关系数为 0.82，而经过湿度修正的相

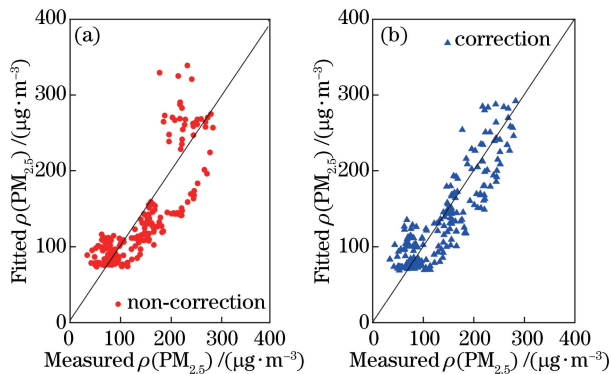


图 7  $PM_{2.5}$  拟合结果。(a) 无湿度修正；(b) 有湿度修正  
Fig. 7 Fitted results of  $PM_{2.5}$ . (a) Without humidity correction; (b) with humidity correction

关系数达到 0.88。另外，在湿度未修正的情况下，拟合结果偏离真实值过大，而经过湿度修正后，拟合结果相对均匀地分布在真实值两侧，故湿度修正可以提高消光系数和质量浓度之间的拟合精确度。

#### 4.4 其他因素的影响

除上述主要原因外，激光雷达系统还存在以下对数据质量有影响的情形：硬件问题，主要包含激光器光源的老化、激光器能量的下降、激光器频率的大幅度降低、光学元器件积灰、老化、损伤、发射光路或接收光路系统失调、光路耦合效率降低、检偏棱镜位置失调、电子器件的老化、电子器件受到干扰等。上述情形可造成探测距离降低、拖尾距离较近、基线不平、噪声变大、高空反演出现异常值等现象。此外，气象条件的变化同样会对激光雷达探测造成一定的影响，雨雪天气会造成数据信噪比较低的情况，重度污染、厚云或低空云甚至会造成探测距离下降或者信号截断的情况。

#### 4.5 多台激光雷达数据一致性对比

对于区域组网联合观测分析，多台仪器之间必须具有较高的一致性。为验证采用上述标准规范的配置和通过一系列标定过程后，是否可以保证激光雷达数据具有较高的一致性，选取同一批次中配置完全一致的两台激光雷达进行分析，仪器位于中国科学院安徽光学精密机械研究所综合楼楼下，观测场地周围无明显污染源，选取 2017 年 10 月 26 日一整天的观测数据绘图，如图 8 所示。结果表明，两台雷达具有非常高的一致性，特别是对边界层内污染物的维持、消散、积累过程监测，和对高空云层结构变化的探测。因此通过这一系列配置和标定后，多台激光雷达数据可以达到较高的一致性和准确性。

## 5 结 论

分析了影响激光雷达探测气溶胶光学特性的不确定因素。分析结果表明，其不确定因素主要包括光机结构设计、电子学光电转换模式、反演算法的参数选取及对比标定过程。通过合理设计采集累加次数，数据抖动性可减少 84%，经球载消光仪数据校正后相关系数达到 0.96，RMSE 低于 0.1。通过一系列配置和标定，可以提高消光系数的反演准确度和精度，从而进一步提高探测  $PM_{2.5}$  质量浓度的精度。影响激光雷达系统反演结果的不确定性因素众多，仪器研制、装调、集成测试、算法反演等每一个环节都需要考虑周全，以提高监测数据的准确性，使仪器设备具有较高的稳定性、可靠性和一致性。

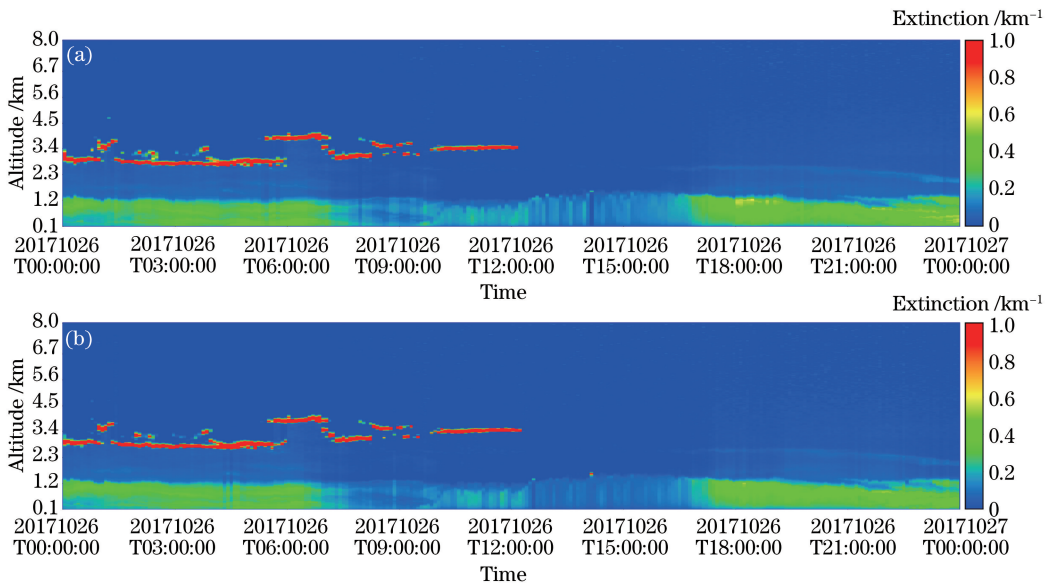


图8 数据一致性对比。(a)雷达1;(b)雷达2

Fig. 8 Comparison of data consistency. (a) Lidar 1; (b) lidar 2

## 参 考 文 献

- [1] Liu H T, Zhong Z Q, Li C, *et al.* Statistical study of energy-optimized distribution for sand-dust detection using airborne lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1913-1919.  
刘厚通, 钟志庆, 李超, 等. 机载激光雷达沙尘探测能量优化配置的统计研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1913-1919.
- [2] Xu C D, Ji Y F, Xu Q S. Mie scattering micro-pulse lidars in atmospheric detection and applications [J]. *China Powder Science and Technology*, 2013, 19(5): 39-42.  
徐赤东, 纪玉峰, 徐青山. 米散射微脉冲激光雷达在大气探测中的应用 [J]. *中国粉体技术*, 2013, 19(5): 39-42.
- [3] Tong Y C, Liu W Q, Zhao N J, *et al.* Observation and research on the typical atmosphere of Beijing Olympic Game by Raman lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 279-283.  
佟彦超, 刘文清, 赵南京, 等. 北京奥运前期典型天气喇曼激光雷达观测研究 [J]. *光子学报*, 2010, 39(2): 279-283.
- [4] Qi B Y, Chen S Y, Zhang Y C, *et al.* Geometric form factor retrieval method for ground-based lidar based on ground-based and space-borne synchronous observation data [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0910003.  
齐白玉, 陈思颖, 张寅超, 等. 星地同步观测数据的
- 地基激光雷达几何因子反演方法 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0910003.
- [5] Shen J, Cao N W. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0610003.  
沈吉, 曹念文. 米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0610003.
- [6] Ma X M, Tao Z M, Zhang L L, *et al.* Ground layer aerosol detection technology during daytime based on side-scattering lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401005.  
麻晓敏, 陶宗明, 张璐璐, 等. 侧向散射激光雷达探测白天近地面气溶胶技术 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0401005.
- [7] Song Y H, Shi L L, Wang Y F, *et al.* Retrieve of lidar ratio of aerosols by iteration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0113001.  
宋跃辉, 时丽丽, 王玉峰, 等. 气溶胶激光雷达比的迭代反演 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0113001.
- [8] Xia J R, Zhang L. Advances in detecting aerosols with Mie lidar [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2006, 24(4): 68-72.  
夏俊荣, 张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展 [J]. *干旱气象*, 2006, 24(4): 68-72.
- [9] Chen Z Y, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Analysis of backscattering signal for a ceilometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, 4(1):



- 75-81.  
陈臻懿, 刘文清, 张玉钧, 等. 激光测云雷达信号分析[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(1): 75-81.
- [10] Sun Z B, Liao X N, Wang Z S, *et al.* Scavenging effect of rime and east wind on PM<sub>2.5</sub> under air heavy pollution in Beijing [J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3679-3685.  
孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 等. 北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM<sub>2.5</sub> 清除作用[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3679-3685.
- [11] Chen Z Y, Liu W Q, Heese B, *et al.* Aerosol optical properties observed by combined Raman-elastic backscatter lidar in winter 2009 in Pearl River Delta, south China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(5): 2496-2510.
- [12] Chen Z Y, Zhang J S, Zhang T S, *et al.* Haze observations by simultaneous lidar and WPS in Beijing before and during APEC, 2014 [J]. Science China Chemistry, 2015, 58(9): 1385-1392.
- [13] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics of boundary layer height in Jing—Jin—Ji area based on lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010101.  
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010101.
- [14] Xue G G, Sun D S, Yan C C, *et al.* A compact aerosol lidar and its signal calibration [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(3): 151-153.  
薛国刚, 孙东松, 闫长春, 等. 小型气溶胶激光雷达及其信号校准[J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 151-153.
- [15] Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0704003.  
项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.
- [16] Zhou J. Research progress on the detection of atmospheric aerosol by laser radar [C] // 9th Symposium on Aerosol Technology Across the Taiwan Straits and the Second Cross Strait Forum on Environmental Protection, Beijing: China Particulate Society Aerosol Specialized Committee, 2012.  
周军. 激光雷达探测大气气溶胶研究进展 [C] // 第九届海峡两岸气溶胶技术研讨会暨第二届海峡两岸环境保护双门论坛论文集, 北京: 中国颗粒学会气溶胶专业委员会, 2012.
- [17] Zhang H Q, Hu H L, Ju H B, *et al.* Study on monitoring techniques of sand and dust parameters using lidar system [J]. Forest Research, 2009, 22(2): 161-165.  
张怀清, 胡红玲, 鞠洪波, 等. 激光雷达沙尘参数提取技术研究 [J]. 林业科学研究, 2009, 22(2): 161-165.
- [18] Gu J. Study on extinction characteristics based on Mie lidar [J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(23): 30-32.  
顾江. 米散射激光雷达探测大气消光特性研究 [J]. 现代电子技术, 2009, 32(23): 30-32.
- [19] Zhang T S, Liu W Q, Zhao X S, *et al.* Particles transport flux monitoring of industrial sources during Beijing Olympic Games by lidar [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(5): 362-367.  
张天舒, 刘文清, 赵雪松, 等. 北京奥运期间工业污染源颗粒物输送通量的激光雷达监测 [J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(5): 362-367.
- [20] Zhang J L, Liu D. Analysis of aerosol deposition process under a stable weather system [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(35): 184-187.  
张嘉霖, 刘东. 一次稳定天气系统下气溶胶沉降过程分析 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(35): 184-187.
- [21] Shen J, Cao N W. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610003.  
沈吉, 曹念文. 米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610003.
- [22] Qi B Y, Chen S Y, Zhang Y C, *et al.* Geometric form factor retrieval method for ground-based lidar based on ground-based and space-borne synchronous observation data [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0910003.  
齐白玉, 陈思颖, 张寅超, 等. 星地同步观测数据的地基激光雷达几何因子反演方法 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0910003.
- [23] Deng P, Zhang T S, Chen W, *et al.* Lidar measurement for atmospheric density and temperature in middle atmosphere over Hefei [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 730003.  
邓潘, 张天舒, 陈卫, 等. 合肥上空中层大气密度和

- 温度的激光雷达探测 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 730003.
- [24] Xu P W, Tan X P, Cai J Z, *et al.* Study on influence factors of urban aerosol on visibility & extinction coefficient [J]. Environmental Pollution and Control, 2005, 27(6): 410-413.  
徐鹏伟, 谭湘萍, 蔡菊珍, 等. 杭州城市大气消光系数和能见度的影响因子研究 [J]. 环境污染与防治, 2005, 27(6): 410-413.
- [25] Zhao S W, Gao X Q. Analysis of spatial-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical depth over the northwest of China by MODIS C6 product [J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2637-2646.  
赵仕伟, 高晓清. 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 [J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2637-2646.
- [26] Zhang W Y, Wang Y Q, Song J Y, *et al.* Research on logarithmic ratio  $k$  of aerosol backscatter extinction using lidar [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1083-1087.  
张文煜, 王音淇, 宋嘉尧, 等. 激光雷达反演参数  $k$  值的研究 [J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1083-1087.
- [27] Lü L, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Observations of particle extinction, PM<sub>2.5</sub> mass concentration profile and flux in north China based on mobile lidar technique [J]. Atmospheric Environment, 2017, 164: 360-369.
- [28] Li X B, Xu Q S, Wei H L, *et al.* Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1655-1658.  
李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1655-1658.