

激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布

麻晓敏^{1,2,3,4}, 陶宗明^{4*}, 单会会⁴, 张辉⁴, 包莉娜⁴, 魏宁⁴, 薛模根⁵, 罗晓琳⁵,
刘东^{1,2}, 王英俭^{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光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

³中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

⁴陆军炮兵防空兵学院基础部, 安徽 合肥 230031;

⁵陆军炮兵防空兵学院信息工程系, 安徽 合肥 230031

摘要 集后向散射激光雷达、侧向散射激光雷达及拉曼散射激光雷达为一体的激光雷达系统在探测对流层气溶胶消光系数时具有两个明显的优点,一是反演时不需要假设激光雷达比(LR),二是不存在近地面的过渡区和盲区。在2017年1月至2018年12月期间,利用一体化激光雷达系统在合肥进行了146天的数据探测,并对气溶胶消光系数进行了反演和统计分析,得出了气溶胶LR平均值为68.4 sr及LR平均值随月份的分布规律,还有气溶胶消光系数月平均、季平均及年平均情况。个例分析表明,高度在0.6 km以下的气溶胶消光系数随高度和时间的变化很复杂,传统后向散射激光雷达很难探测到。对比分析了利用LR经验值反演气溶胶消光系数引起的误差大小。这些探测结果为研究大气污染传输和大气污染防治提供了科学依据。

关键词 大气光学; 气溶胶; 消光系数; 侧向散射激光雷达; 拉曼散射激光雷达; 激光雷达比

中图分类号 P412.25

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1101003

Statistical Distribution of Extinction Coefficients of Tropospheric Aerosols Detected by Lidar

Ma Xiaomin^{1,2,3,4}, Tao Zongming^{4*}, Shan Huihui⁴, Zhang Hui⁴, Bao Lina⁴,
Wei Ning⁴, Xue Mogen⁵, Luo Xiaolin⁵, Liu Dong^{1,2}, Wang Yingjian^{1,2}

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

²Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

³Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China,
Hefei, Anhui 230026, China;

⁴Department of Basic Sciences, Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei, Anhui 230031, China;

⁵Department of Information Engineering, Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract A lidar system that combines backscattering, side-scattering, and Raman-scattering lidars has two obvious advantages in detecting the extinction coefficients of tropospheric aerosols: 1) the lidar ratio (LR) does not need to be assumed in the retrieval of aerosol extinction coefficients; 2) there are no near-ground transition and blind areas. Herein, we obtain the 146-day data by using an integrated lidar system in Hefei city from January 2017 to December 2018. We retrieve and statistically analyze the extinction coefficients of aerosols to get the average LR of aerosols of 68.4 sr, the monthly distribution of average LR, and the monthly, seasonal, and annual average profiles of aerosol extinction coefficients. Some cases show that the aerosol extinction coefficient versus height and time is very complicated under 0.6 km altitude, which cannot be detected by the traditional backscattering lidar. Moreover, the errors in the aerosol extinction coefficient retrieved from the empirical LR are analyzed by comparison. The obtained results provide a scientific basis for studying air pollution transmission and control.

收稿日期: 2020-01-10; 修回日期: 2020-03-03; 录用日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41475025)

* E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

Key words atmospheric optics; aerosol; extinction coefficient; side-scattering lidar; Raman-scattering lidar; lidar ratio

OCIS codes 010.1110; 010.7030; 040.1520; 290.2200

1 引 言

大气气溶胶是一种悬浮于空气中的固态和液态微粒共同组成的多相体系,其粒径为 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 。大气气溶胶在空气中的运动主要为沉降运动、扩散运动及热运动。气溶胶粒子在空气中的密度远远小于空气分子密度,所以不会发生过度的碰撞、凝并,能保持相对稳定的气溶胶状态^[1]。气溶胶在地球大气层中可谓无时不在,无处不有,一部分气溶胶可以作为云雾滴的凝结核,对云和降水的形成起到核化作用,通过短波吸收和长波辐射,直接影响地-气之间的辐射收支平衡^[2]。气溶胶随高度变化的特征既对局部地区的气候和天气有着重要的影响,也对大气辐射强迫、地面辐射收支及大气层顶等问题有直接影响。同时,气溶胶主要分布在大气边界层内,它的浓度与人体健康密切相关,因此,高精度、无盲区、无过渡区地探测大气气溶胶消光系数廓线对全球气候变化研究和环境监测有十分重要的意义。

激光雷达作为一种主动遥感设备,可以对气溶胶的时空分布进行高分辨率探测^[3-5],近地面过渡区和盲区的存在是普通的后向散射激光雷达系统的缺陷^[6-7],而该范围正是气溶胶的富集区,这就使得后向散射激光雷达不适合于近地面段的大气探测。侧向散射激光雷达是近年来发展的一种新技术^[8],在近地面段不存在过渡区和盲区,而且由于光路的设置,近地面区域的空间分辨率很高,但在远距离处空间分辨率和信噪比都较差。联合后向散射激光雷达和侧向散射激光雷达来探测气溶胶,能实现优势互补。

通过单一后向散射激光雷达方程反演气溶胶消光系数或后向散射系数时,常需要其他信息作为辅助^[9-10],或需假设激光雷达比(LR)为某一经验值,将两个未知量转换为一个未知量。由于LR是空间和时间的复杂函数,它与气溶胶的尺度谱、气溶胶的组成都有关系^[11]。有研究指出,LR的误差对气溶胶消光系数的反演结果的精确性有很大影响,特别是在气溶胶分布不均匀时,影响更大^[12]。在不同的气象条件、不同的地理位置反演气溶胶消光系数时,

必须给出实测的LR值^[13]。氮气拉曼激光雷达不需要假设条件,可以直接反演出LR。因此集后向、侧向及拉曼散射激光雷达于一体的激光雷达系统,在不假设LR的前提下,就能较精确地反演出对流层气溶胶的消光系数或后向散射系数的无盲区、无过渡区廓线。本文首先简介一体化激光雷达探测系统,然后对反演方法进行理论分析,最后给出个例分析,得到LR随月份的变化曲线及气溶胶消光系数月平均、季平均及年平均廓线。

2 探测系统与反演方法

2.1 探测系统

所用的一体化激光雷达探测系统主要由发射器、接收器、几何标定装置及控制器4部分组成。发射器为Nd:YAG激光器,发射激光的波长为532 nm。后向散射激光雷达接收装置为望远镜,它有2个米散射接收通道、2个拉曼散射接收通道,分别接收532 nm平行信号、532 nm垂直信号;607 nm氮气拉曼信号及660 nm水汽拉曼信号;侧向散射激光雷达接收装置为电荷耦合器件(CCD)。控制器主要用于参数和工作时序的设置。该一体化系统的主要工作原理是:垂直射向大气中的激光与大气相互作用,产生各个方向的散射光,CCD相机中的像元接收光束上不同高度的侧向散射回波信号,望远镜和光电倍增管(PMT)接收不同高度的607 nm氮气拉曼信号、660 nm水汽拉曼信号及532 nm后向散射回波信号;利用几何标定装置,确定CCD相机中各像元与光束上不同高度散射光中心之间的对应关系^[13];根据大气中氮气的分布规律和氮气拉曼散射激光雷达方程,再融合532 nm通道的后向散射信号,可反演出LR。将532 nm后向散射信号和侧向散射信号相结合可进一步降低几何因子的影响。所以,一体化的激光雷达系统在不假设LR的前提下,就可得到对流层内气溶胶消光系数无盲区、无过渡区廓线。实验装置如图1所示,系统主要硬件参数见文献[2]。

2.2 反演方法

后向散射激光雷达方程、氮气拉曼激光雷达方程、侧向散射激光雷达方程^[14-15]分别为

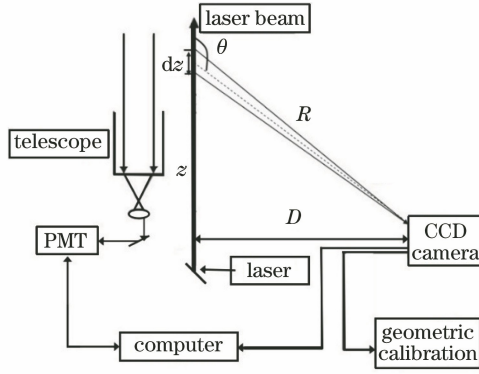


图 1 一体化探测系统示意图
Fig. 1 Diagram of combined detection system

$$P(\lambda, z) = kE \frac{\beta_a(\lambda, z) + \beta_m(\lambda, z)}{z^2} \times \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha_a(\lambda, z') + \alpha_m(\lambda, z')] dz'\right\}, \quad (1)$$

$$P_N(\lambda_N, z) = k_N E \frac{\sigma_N n_N(z)}{z^2} \times \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_a(\lambda, z') + \alpha_m(\lambda, z') + \alpha_a(\lambda_N, z') + \alpha_m(\lambda_N, z')] dz'\right\}, \quad (2)$$

$$P_C(z, \theta) = k_c \frac{E}{D} \left[\frac{\beta_a(\lambda, z)}{f_a(\pi)} f_a(\theta) + \frac{\beta_m(\lambda, z)}{f_m(\pi)} f_m(\theta) \right] \times \exp\{-[1 + 1/\cos(\pi - \theta)] \times \int_0^z [\alpha_a(\lambda, z') + \alpha_m(\lambda, z')] dz'\} \Delta\theta, \quad (3)$$

式中： $P(\lambda, z)$ 为后向散射系统接收到的在高度 z 处的大气后向散射信号强度； $P_N(\lambda_N, z)$ 为后向散射系统接收到的在高度 z 处的氮气回波信号强度； $P_C(z, \theta)$ 为侧向散射激光雷达中 CCD 单个像元接收的高度为 z 、散射角为 θ 、角宽度为 $\Delta\theta$ 的气溶胶侧向散射信号强度； k, k_N, k_c 分别为后向散射系统常数、氮气通道的系统常数、侧向散射系统常数； E 为发射激光的能量； λ, λ_N 分别为发射波长（为

532 nm）、氮气分子的拉曼散射波长（为 607 nm）；下标 a、m 分别表示气溶胶和大气分子； $\beta(\lambda, z)$ 为在高度 z 处的大气在波长 λ 上的后向散射系数； $\alpha(\lambda, z')$ 、 $\alpha(\lambda_N, z')$ 分别为在高度 z' 处的发射波长和氮气分子拉曼散射波长处的大气消光系数； σ_N 为氮气分子的后向微分拉曼散射截面； $n_N(z)$ 为在高度 z 处的氮气分子的数密度； D 为 CCD 到激光束的水平距离； $f(\theta)$ 为相函数。

联合(1)式和(2)式可以求解大气气溶胶的后向散射系数^[16-17]：

$$\beta_a(\lambda, z) = -\beta_m(\lambda, z) + [\beta_a(\lambda, z_c) + \beta_m(\lambda, z_c)] \frac{P_N(\lambda_N, z_c) P(\lambda, z)}{P(\lambda, z_c) P_N(\lambda_N, z)} \times \frac{n_N(z)}{n_N(z_c)} \times \frac{\exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda_N, z') + \alpha_m(\lambda_N, z')] dz'\right\}}{\exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda, z') + \alpha_m(\lambda, z')] dz'\right\}}, \quad (4)$$

式中： z_c 为标定点高度，该高度处 $\beta_a(\lambda, z_c) \ll \beta_m(\lambda, z_c)$ 。

由(2)式可求解气溶胶的消光系数^[16-17]：

$$\alpha_a(\lambda, z) = \frac{d/dz [\ln n_N(z) / P_N(\lambda_N, z) z^2] - \alpha_m(\lambda, z) - \alpha_m(\lambda_N, z)}{1 + (\lambda/\lambda_N)^i}, \quad (5)$$

式中： i 为气溶胶的 Angstrom 指数。理论与数值模拟均表明， i 的取值对消光系数的反演结果影响很小，对流层气溶胶中， i 常设为 1。氮气分子的数密度可以从当地的探空资料中获得。

由(4)、(5)式，可计算出 LR 廓线：

$$s_1(\lambda, z) = \frac{\alpha_a(\lambda, z)}{\beta_a(\lambda, z)}. \quad (6)$$

大气分子的消光系数、后向散射系数、LR 及相

函数可以依据瑞利散射理论从标准大气模式中得到;由(4)~(6)式反演得出后向散射激光雷达充满区内(0.6 km 以上高度的区域)的气溶胶后向散射系数、消光系数及 LR;利用太阳辐射计或水平方向工作的侧向散射激光雷达探测气溶胶的相函数;选择侧向和后向散射激光雷达重叠区内的一点作为侧向散射激光雷达参考点,由后向散射激光雷达采集参考点的消光系数值,结合(3)式和其他参数,由递推法可反演出近地面气溶胶消光系数廓线;侧向、后向散射激光雷达取长补短,在近距离段和远距离段分别取侧向散射激光雷达和后向散射激光雷达反演的气溶胶消光系数,在重叠区取两激光雷达反演出的气溶胶消光系数的平均值,从而获得从地面开始的气溶胶消光系数无盲区、无过渡区廓线,其结果的正确性已被验证^[14-15]。

侧向散射激光雷达的空间分辨率随高度的升高而快速降低,而后向散射激光雷达对过渡区以下的信号接收不完整,信噪比较小。故在紧邻后向散射

激光雷达过渡区上方一定高度范围(0.6~1.1 km)内,侧向散射激光雷达信号与后向散射激光雷达信号都具有较高的信噪比和空间分辨率,这一范围称为重叠区,在这一高度范围的上方称为远距离,在这一高度的下方称为近距离。近距离和远距离与 CCD 相机到激光束的水平距离、CCD 相机的张角、后向散射激光雷达的过渡区和盲区等因素有关。

3 结果与分析

实验探测系统位于合肥市蜀山区黄山路中段。在 2017 年 1 月到 2018 年 12 月期间,该一体化激光雷达系统共进行了 146 晚的探测实验,具体实验时间分布如表 1 所示。

3.1 个例分析

该一体化激光雷达系统的优势主要表现在两个方面:近地面无盲区、无过渡区的探测能力和气溶胶消光系数廓线的高精度探测。下面给出一些反映近地面探测优势和高精度的个例。

表 1 实验时间分布一览表

Table 1 List of experimental time distribution

Date	Number of nights	Date	Number of nights	Date	Number of nights	Date	Number of nights
2017.01	4	2017.07	2	2018.01	2	2018.07	7
2017.02	3	2017.08	2	2018.02	2	2018.08	11
2017.03	3	2017.09	6	2018.03	5	2018.09	8
2017.04	3	2017.10	12	2018.04	6	2018.10	5
2017.05	12	2017.11	12	2018.05	4	2018.11	8
2017.06	8	2017.12	11	2018.06	8	2018.12	2

近地面气溶胶随高度和时间的变化是比较复杂的,图 2 为该一体化激光雷达系统在不同时间探测的 4 组近地面气溶胶消光系数廓线。在这 4 次探测中,近地面气溶胶的消光系数最大值(2017-01-13T20:40)约为最小值(2018-08-14T21:40)的 10 倍;在 2018-08-14T21:40 时高度,1.0 km 以下的气溶胶消光系数随高度的升高而增大,而在 2017-01-13T20:40 时,高度 1.0 km 以下的气溶胶消光系数随高度的升高而减小;2017-11-02T01:30 的探测结果表明近地面 0.5 km 以下的气溶胶出现多层结构;在 2017-11-02T04:30 的探测中发现高度 0.1 km 左右存在一层低薄云,该处消光系数约为 0.8 km^{-1} 。近地面的这些细节是后向散射激光雷达不可能探测到的,而侧向散射激光雷达弥补了后向散射激光雷达在探测近地面气溶胶时的不足。

为了研究气溶胶随时间的连续变化情况,于 2018-09-29T17:00—2018-09-31T07:00 进行 39 h 的连续探测。2018-09-29—2018-09-31 的天气为

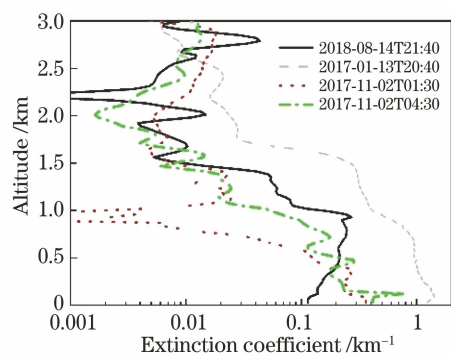


图 2 近地面气溶胶消光系数廓线

晴,图 3(a)是激光雷达反演的近地面气溶胶消光系数时空分布图,图 3(b)是对应时间内激光雷达系统所在处地面直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)质量浓度和地面气溶胶消光系数曲线,图 3(c)是对应时间内激光雷达系统所在处地面相对湿度和地面气溶胶消光系数曲线。其中地面上 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度由所在处的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测仪探测,地

面气溶胶消光系数是激光雷达反演廓线中 12 m 高度处的数值。从图 3(a)可知,除 29 日 18:00 到 23:00 和 30 日 16:00 到 20:00 外,气溶胶消光系数都是随高度的增加而呈减小趋势;29 日 17:00 到 24:00 之间边界层的高度比较稳定,基本保持在 1.8 km 左右;30 日 01:00 到 20:00 之间边界层的高度变化非常复杂;30 日 20:00 到 31 日 07:00 之间边界层的高度变化不大,在 2.1 km 上下波动。气溶胶消光系数受 $PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度综合影响^[18],且气溶胶粒子吸湿后有个粒径增长的过程。从图 3(b)可知,地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度和地面气溶胶消光系数整体上相关性很好;但是在 30 日 02:00 到 03:00 之间地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度从 $90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小为 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而气溶胶消光系数却呈持续增大趋势,其原因从图 3(c)中可知,在该时间段内大气相对湿度大于 90%,且有继续增大的趋势;30 日 04:00 到 05:00 之间 $PM_{2.5}$ 质量浓度不变,但气溶胶消光

系数稍有增加,其原因也是对应时间段内相对湿度的持续增加;30 日 05:00 到 07:00 之间 $PM_{2.5}$ 质量浓度先减小再增大,但气溶胶消光系数的增加过程滞后于 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化过程,这是因为该时间段内相对湿度持续增加,气溶胶粒子吸湿后有个粒径增加的过程;30 日 12:00 到 24:00 之间 $PM_{2.5}$ 质量浓度和气溶胶消光系数都出现了一个小高峰,但从图 3(c)可以看出,对应时间段内的相对湿度却处于低谷,这是因为该时间段内相对湿度都很小,在 40% 左右,气溶胶吸湿不明显,气溶胶消光系数主要由 $PM_{2.5}$ 质量浓度决定;31 日 04:00 到 07:00 之间 $PM_{2.5}$ 质量浓度持续减小,但气溶胶消光系数变化不明显,这也是因为该时间段内相对湿度都很大且在持续增加。图 3 中气溶胶消光系数是从地面 12 m 高度开始,反映了一体化激光雷达系统可以对对流层气溶胶进行无盲区、无过渡区的探测。

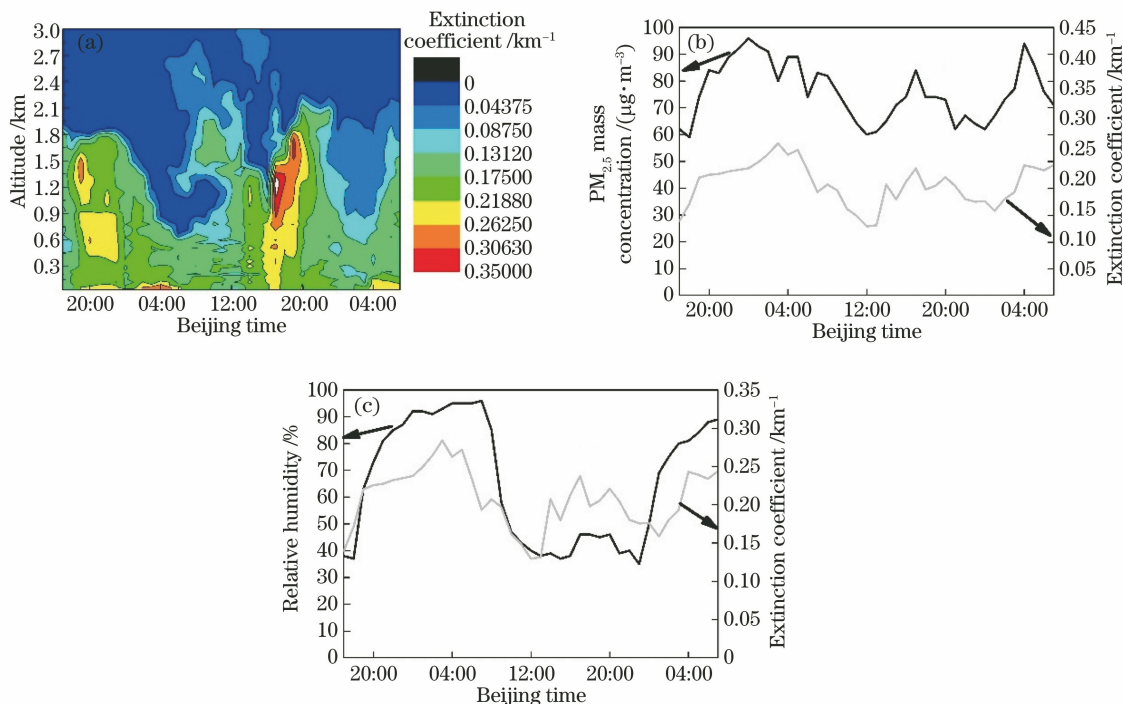


图 3 39 h 连续探测结果。(a) 近地面气溶胶消光系数廓线时空分布图;(b) 地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度和地面气溶胶消光系数曲线;(c) 地面相对湿度和地面气溶胶消光系数曲线

Fig. 3 Continuous measurement results under 39 hours. (a) Spatiotemporal distribution of near-ground aerosol extinction coefficient profiles; (b) $PM_{2.5}$ mass concentration and aerosol extinction coefficient curves at ground; (c) relative humidity and aerosol extinction coefficient curves at ground

LR 是随空间和时间变化的一个重要参数,它与气溶胶粒子的尺度谱、复折射率及气溶胶的组成等密切相关,可以通过测量不同地区的 LR 来确定该地区气溶胶的类型。对于对流层的大气气溶胶,

波长为 532 nm 的激光 LR 常取 50 sr 作为经验值^[16,19],它的误差对气溶胶消光系数的反演精度和整层大气的光学厚度精度有很大影响,所以实时探测 LR 是很有必要的。为此,选择 LR 差别较大的 4

组实测值和 LR 的经验值来反演气溶胶消光系数廓线,并进行对比,其结果如图 4 所示,实验中拉曼激光雷达反演的 LR 分别为 120, 80, 55, 40 sr, 分别是经验值的 2.4 倍, 1.6 倍, 1.1 倍及 4/5。从图 4 可以看出,由经验值和实测的 LR 反演出的气溶胶消光系数廓线是不同的,且不同高度上的消光系数相对偏差大小也随高度的变化而变化,反演出的消光系

数误差与 LR 的偏差呈正相关。转换成对流层光学厚度后,结果如表 2 所示,用 LR 的经验值反演得到的对流层光学厚度和用图 4 中 4 个个例 LR 的实测值反演得到的对流层光学厚度相比,误差分别达 32.5%、17.6%、5.7%、18.5%。故利用一体化激光雷达实时探测 LR 并反演气溶胶的消光系数,可以大大提高反演结果的精度。

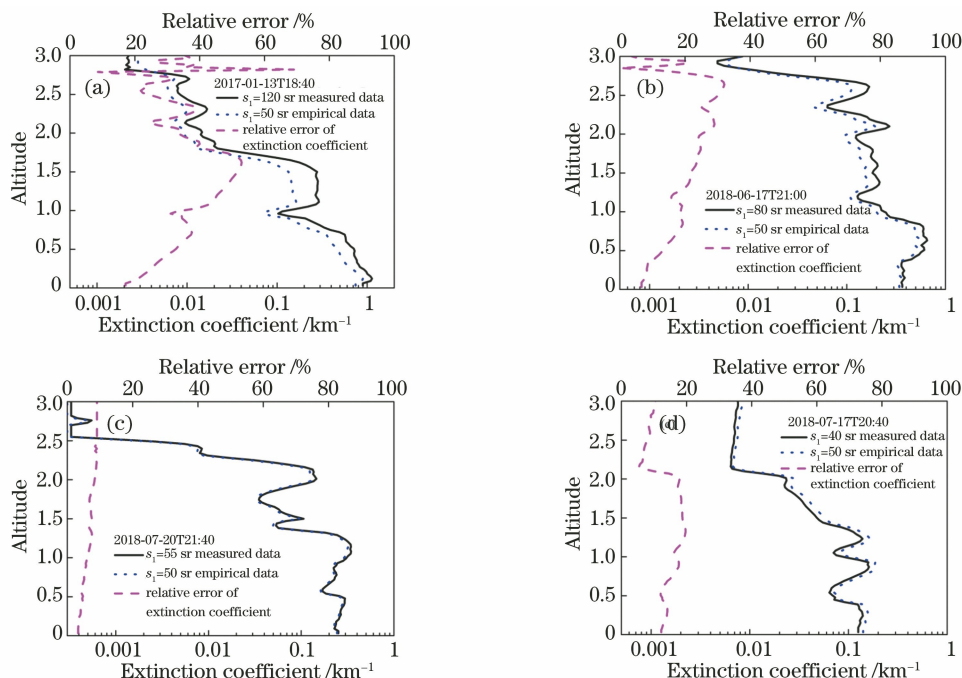


图 4 LR 经验值和实测值反演的气溶胶消光系数廓线对比图。(a) $s_1 = 120$ sr; (b) $s_1 = 80$ sr; (c) $s_1 = 55$ sr; (d) $s_1 = 40$ sr

Fig. 4 Comparison of aerosol extinction coefficient profiles retrieved from empirical and measured data.

(a) $s_1 = 120$ sr; (b) $s_1 = 80$ sr; (c) $s_1 = 55$ sr; (d) $s_1 = 40$ sr

表 2 图 4 中个例的光学厚度

Table 2 Optical depths corresponding to examples in Fig.4

Figure	From empirical LR	From measured LR	Relative error / %
Fig. 4(a)	0.554	0.815	32.5
Fig. 4(b)	0.612	0.743	17.6
Fig. 4(c)	0.392	0.416	5.7
Fig. 4(d)	0.213	0.184	18.5

3.2 气溶胶激光雷达比的统计分布

为了了解合肥地区气溶胶的光学特性,利用一体化激光雷达系统的拉曼通道信号直接反演出 LR,并对 2017 年 1 月到 2018 年 12 月两年中 146 天实验数据进行统计,结果如图 5 所示,竖线表示 LR 的变化范围,小方点表示当月 LR 的平均值。统计发现,实验期间 LR 的最小值为 40 sr,最大值为 120 sr,平均值为 68.4 sr。Wu 等^[19]在假设 LR 为 50 sr 的前提下利用米散射激光雷达研究了从 1998 年到 2009 年的合肥地区对流层气溶胶后向散射系数的统计规律,结果与经验值 50 sr 相差较大。

从图 5 还可看出,1 月份 LR 平均值最大,为 93 sr,2 月份和 7 月份最小,都为 50 sr。由于实验时间有限,该曲线仅能说明实验期间的 LR 平均情况。

3.3 对流层内气溶胶消光系数廓线的统计分布

利用一体化激光雷达系统对 2017 年 1 月至 2018 年 12 月共 146 个夜晚的数据进行了探测,应用所提方法和同步探测的 LR 对探测数据进行了反演,得到了从地面到 12 km 高度内的气溶胶消光系数的月平均、季平均及年平均无盲区、无过渡区廓线。为了减少云、暗电流等的影响,在数据统计过程中对 4 km 以上的数据剔除了云的干扰,并进行平

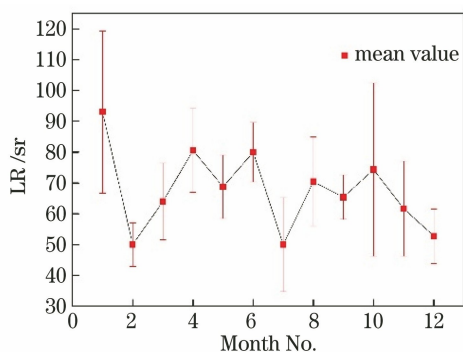


图 5 LR 平均值随月份的变化曲线

Fig. 5 Average LR versus month

滑处理,结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,1 月份近地面消光系数平均值最大,这一方面与冬季取暖,灰霾天气增多有关,另一方面也与实验时间有关;其他月份近地面气溶胶消光系数差异不大,整体

上都呈随高度的升高而减小的趋势。从图 6(b)可以看出,地面处冬季气溶胶消光系数平均值最大,约为 0.65 km^{-1} ,春季平均值最小,约为 0.3 km^{-1} ,夏季和秋季分别约为 0.35 km^{-1} 和 0.45 km^{-1} ;高度 4 km 以下气溶胶消光系数季平均值随高度的升高而减小,春、秋、冬季在高度 2.5~4 km 之间都出现一层气溶胶消光系数增大层。从图 6(c)可以看出,2017 年、2018 年地面处气溶胶消光系数年平均平均值分别为 0.45 km^{-1} 、 0.4 km^{-1} ,并随着高度的增加而减小;在高度 0~0.5 km 之间 2017 年的气溶胶消光系数平均值略大于 2018 年的平均值,0.5~3 km 之间 2017 年的气溶胶消光系数平均值略小于 2018 年的平均值,2017 年在 3~4 km 之间出现一层气溶胶消光系数增大层。4 km 以上气溶胶消光系数的月平均廓线、季平均廓线及年平均廓线变化随高度的变化都不明显。

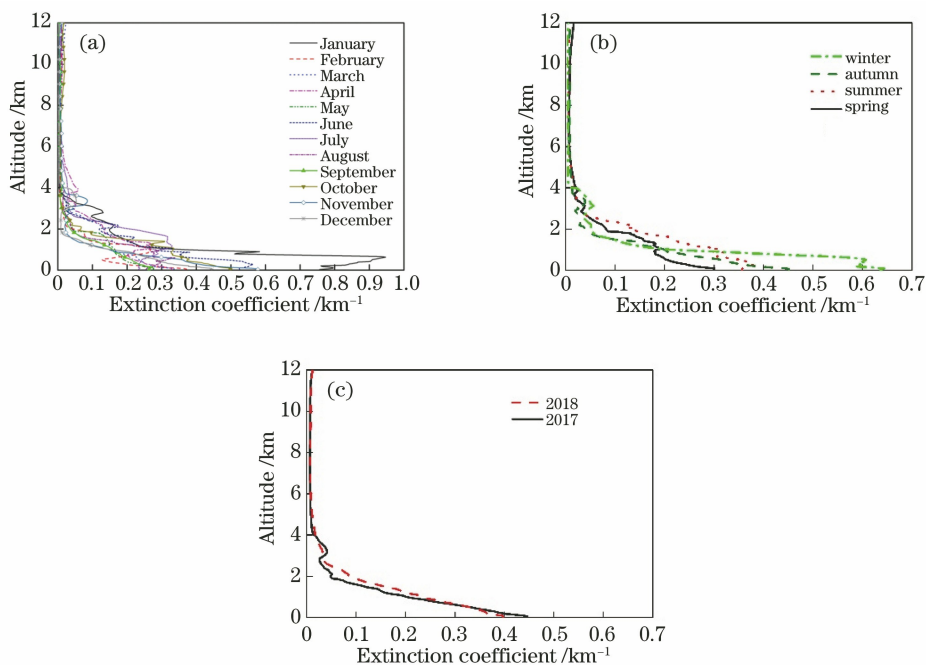


图 6 气溶胶消光系数廓线。(a)月平均;(b)季平均;(c)年平均

Fig. 6 Profiles of aerosol extinction coefficients. (a) Monthly average; (b) seasonal average; (c) annual average

4 结 论

介绍的一体化激光雷达系统可以在不假设 LR 的前提下,对对流层气溶胶消光系数廓线进行无盲区、无过渡区探测,这对研究局部地区气候变化有着重要的意义,也可为制定大气污染防治政策提供重要数据。一体化激光雷达系统一方面利用拉曼通道直接反演实时的 LR,大大降低了反演气溶胶消光系数的误差;另一方面,利用侧向散射激光雷达弥补了后向散射激光雷达在近地面存在盲区和过渡区的

缺陷,故可以得到对流层气溶胶较精确、较完整的消光系数廓线。个例研究表明,在后向散射激光雷达探测不到的区域,气溶胶随高度和时间的变化情况很复杂,有时随高度升高而增大,有时随高度升高而减小,还会出现低云等现象,所提系统可为精细化研究近地面气溶胶的变化提供有力保障。将连续 39 h 的气溶胶消光系数反演结果与同一时间段同一地点地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度变化规律进行比较,进一步说明一体化激光雷达系统近地面探测的可靠性。通过 2017 年和 2018 年长达两年的数据积

累,统计分析了LR的平均值和随月份变化曲线,对流层内12 km高度以下气溶胶消光系数月平均廓线、季平均廓线及年平均廓线,数据结果为进一步研究合肥地区气溶胶随月份、季节、年度的变化情况提供了数据支撑。

参 考 文 献

- [1] Lu Z Y. Introduction to aerosol science[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 2-4.
卢正永. 气溶胶科学引论[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 2-4.
- [2] Tao Z M, Shan H H, Z H, et al. Development of lidar system based on one wavelength emission and five channel receivers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1030002.
陶宗明, 单会会, 张辉, 等. 单波长发射五通道接收激光雷达系统研制[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1030002.
- [3] Huang Z W, Huang J P, Bi J R, et al. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U. S. joint dust field experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: D00K15.
- [4] Liu J J, Zheng Y F, Li Z Q, et al. Seasonal variations of aerosol optical properties, vertical distribution and associated radiative effects in the Yangtze Delta region of China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117: D00K38.
- [5] Tao Z M, Shan H H, Ma X M, et al. Retrieval method of $PM_{2.5}$ mass concentration profile in near-ground and case study[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110102.
陶宗明, 单会会, 麻晓敏, 等. 近地面 $PM_{2.5}$ 质量浓度廓线反演方法及个例研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110102.
- [6] Dho S W, Park Y J, Kong H J. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere [J]. Applied Optics, 1997, 36(24): 6009-6010.
- [7] Hu S X, Wang X B, Wu Y H, et al. Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals[J]. Optics Letters, 2005, 30(14): 1879-1881.
- [8] Ma X M, Shi B, Shan H H, et al. Geometric calibration method of side-scatter lidar based on charge-coupled device [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0201002.
麻晓敏, 史博, 单会会, 等. 基于 CCD 成像的侧向散射激光雷达几何标定方法[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0201002.
- [9] Raut J C, Chazette P. Retrieval of aerosol complex refractive index from a synergy between lidar, sunphotometer and *in situ* measurements during LISAIR experiment[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7(11): 2797-2815.
- [10] Sasano Y, Browell E V, Ismail S. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution [J]. Applied Optics, 1985, 24(22): 3929-3932.
- [11] Kovalev V A, Bristow M P. Compensational three-wavelength differential-absorption lidar technique for reducing the influence of differential scattering on ozone-concentration measurements [J]. Applied Optics, 1996, 35(24): 4790-4797.
- [12] Doherty S J, Anderson T L, Charlson R J. Measurement of the lidar ratio for atmospheric aerosols with a 180° backscatter nephelometer [J]. Applied Optics, 1999, 38(9): 1823-1832.
- [13] Zhang Z Y, Su L, Chen L F. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.
- [14] Tao Z M, Liu D, Wang Z 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): 1127-1133.
- [15] Ma X M, Zhang H, Shan H H, et al. Statistical distribution of aerosol backscattering coefficient profiles in near-ground at west suburb of Hefei in 2014[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0705001.
麻晓敏, 张辉, 单会会, 等. 合肥西郊 2014 年近地面气溶胶后向散射系数廓线统计分布[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0705001.
- [16] Wu D C, Liu B, Qi F D, et al. Tropospheric aerosols optical properties measured by a Raman-Mie lidar [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(1): 18-26.
吴德成, 刘博, 戚福弟, 等. Raman-Mie 激光雷达测量对流层大气气溶胶光学特性[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 18-26.
- [17] Ansmann A, Riebesell M, Wandinger U, et al. Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio [J]. Applied Physics B: Photophysics and Laser Chemistry, 1992, 55(1): 18-28.

- [18] Zhang H, Tao Z M, Ma X M, et al. Fitting of hygroscopic factor between $PM_{2.5}$ mass concentration and aerosol backscattering coefficient in Hefei area [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (7): 0704006.
张辉, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 合肥地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0704006.
- [19] Wu D C, Zhou J, Liu D, et al. 12-year LIDAR observations of tropospheric aerosol over Hefei (31.9°N, 117.2°E), China [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2011, 15(1): 90-95.