

## 大气气溶胶污染监测中应用的新型全天时户外型 拉曼-米散射激光雷达系统

滕 曼<sup>1</sup>, 庄 鹏<sup>2,3</sup>, 张站业<sup>2,3</sup>, 李 路<sup>2,3</sup>, 姚雅伟<sup>1,2</sup>

- (1. 中国环境监测总站 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012;  
2. 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;  
3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230021)

**摘 要:** 介绍在大气气溶胶污染监测中应用的新型全天时户外型拉曼-米散射激光雷达系统, 主要用于对大气边界层结构、对流层气溶胶和云光学特征及其形态进行自动连续观测。该系统在整体结构方面, 运用成熟的米散射、偏振和拉曼激光雷达技术, 采用一体化设计, 结构紧凑, 便于运输, 外场试验无需安装和调试; 在系统控制方面, 采用一键式启动, 操作简单, 同时具备手动和自动两种工作模式, 并具有网络控制和数据传输功能; 在数据处理方面, 采用自动和人工两套处理软件, 前者可根据系统设置自动处理和实时显示测量结果, 后者则根据用户设定参数对原始测量数据进行数据反演和显示。该系统真正实现了激光雷达的产品化应用要求, 可广泛运用于大气环境监测和大气科学等研究领域。

**关键词:** 激光雷达; 拉曼; 偏振; 气溶胶; 污染

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0706001

## New all-weather outdoor Raman-Mie scattering lidar system used in atmospheric aerosol pollution monitoring

Teng Man<sup>1</sup>, Zhuang Peng<sup>2,3</sup>, Zhang Zhanye<sup>2,3</sup>, Li Lu<sup>2,3</sup>, Yao Yawei<sup>1,2</sup>

- (1. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
3. University of Science and Technology of China, Hefei 230021, China)

**Abstract:** A new all-weather outdoor Raman-Mie scattering lidar system was developed and used in the atmospheric aerosol pollution monitoring for the continuous observation of atmospheric boundary layer, tropospheric aerosol and cloud optical characteristics. In lidar system design, this lidar system adopted the existing mature technology of Mie scattering, polarization and Raman lidar remote sensing, and its structure was compact and convenient for transportation. In lidar control design, it was easy to operate with one-touch button and the system was available with manual and automatic working modes as well as network control and data transmission functions. The automatic and manual retrieval software were applied in the lidar data processing. The former can automatically process and display the observed

收稿日期: 2019-01-11; 修订日期: 2019-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(41405032); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G06-01-20)

作者简介: 滕曼(1981-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事环境标准体系和保障大气监测数据质量方面的研究。Email: tengman@cncem.cn

通讯作者: 姚雅伟(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事大气环境监测方面的研究。Email: yaoyw@cncem.cn

results in real time according to the system settings, while the latter can retrieve and display the accurate observation data according to the parameters set by the user. This lidar system has achieved the requirements of production application and it can be widely used in the fields of atmospheric environment monitoring and atmospheric science.

**Key words:** lidar; Raman; depolarization; aerosol; pollution

## 0 引言

激光雷达是传统雷达技术和现代激光技术的结合体,是电磁波雷达探测技术从厘米波、毫米波向光波探测技术的延伸。相对于其他电磁波雷达技术,光波具有较短的波长,因此激光雷达可以利用激光与大气中存在的空气分子和气溶胶粒子间的相互作用来实现对大气光学与物理特性,以及大气气象参数的主动遥感探测。同时激光在单色性、方向性、相干性和高亮度上的良好特性促使激光雷达在测量高度、时空分辨率、测量精度以及连续自动监测等方面都具有传统大气探测手段所无法比拟的优势。经过几十年的发展,激光雷达现已广泛运用于激光大气传输、气溶胶和云辐射效应、大气环境监测以及全球气候模式等研究领域<sup>[1-6]</sup>。

由于受到激光和信号探测技术的限制,早期的激光雷达系统复杂、体积庞大、操作困难,因此仅仅局限于实验室内由专业人员进行操作。而随着近年来激光技术、信号探测技术和数据采集与控制技术的飞速发展,激光雷达已逐步走出实验室向小型化和简单化方向发展,其产品化开发与应用也受到越来越多的关注。1992年,美国 NASA 的 GSFC(Goddard Space Flight Center)研发的微脉冲激光雷达(Micro Pulse Lidar)是世界上首台商品化的激光雷达产品<sup>[6]</sup>。该产品采用固态二极管激光器作为发射光源,利用微焦单脉冲能量、千赫兹发射频率、微弧度接收视场以及高量子效率光子探测等先进技术保证其实现对对流层大气气溶胶和云的长时间连续观测,截止到现在全球已布设近 28 台组成微脉冲激光雷达网,配合 AERONET 进行大气气溶胶和云观测以及卫星地面定标。但该产品的致命弱点是其设计结构会将发射激光反射到探测器阴极面造成系统损伤,同时其较长的过渡区会导致低层大气探测出现较大的测量误差。除了 NASA 的微脉冲激光雷达,近些年又不断涌现出类似的激光雷达产品。譬如法国 CIMEL 公司

的 CAML 气溶胶和云微脉冲激光雷达,希腊 Kipp&Zone 公司的 Raymetrics 后向散射激光雷达,以及法国 Leosphere 公司的 ALS 气溶胶激光雷达系统。

由于米散射激光雷达类型结构简单,成本较低,因此上述所有激光雷达产品均为米散射类型,主要用于大气边界层气溶胶和云的自动连续观测。虽然这些激光雷达产品都号称其探测距离可以达到十几公里甚至几十公里以上,以及测量数据可以自动反演而无需人工干预,但是实际情况并非如此。米散射激光雷达最重要的功能便是测量反演出大气消光系数(Extinction Coefficient, EC)或后向散射系数(Backscatter Coefficient, BC)的垂直廓线,但其数据反演方法决定米散射激光雷达测量信号必须能够达到对流层顶附近的大气洁净层,且具有足够的信噪比用于满足雷达信号反演的标定要求<sup>[7]</sup>。上述激光雷达产品给出的均为原始信号探测距离,而这并不能表示该产品可以准确提供用户更为关心的反演数据,即大气消光系数或后向散射系数。此外,实际复杂的大气状况和激光雷达的性能降低都将导致探测距离达不到数据反演的要求,直接影响到反演结果的精度,甚至无法得到有效反演结果,这也导致现今的激光雷达产品在数据处理上只能给出距离平方订正信号,而无法自动反演给出大气消光或散射系数的垂直廓线。

中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心早在 20 世纪 90 年代便开始从事激光雷达大气探测技术方面的研究工作,也一直致力于国产激光雷达产品的研制。此文着重介绍本单位应用的该中心最新开发的拉曼-米散射激光雷达产品,主要用于对大气边界层结构、对流层气溶胶和云光学特征及其形态进行自动连续观测。该系统重点从用户角度出发,并结合在激光雷达系统研制和数据反演方法研究上的优势,不论是在整体结构方面,还是在系统控制以及数据处理方面较之前期研制的激光雷达都

有很大改进,加深国产激光雷达的产品化进程。文中首先描述拉曼-米散射激光雷达产品的测量原理,其次给出该产品的系统介绍,最后给出其测量结果和结论。

### 1 测量原理

拉曼-米散射激光雷达产品主要涉及米散射激光雷达、偏振激光雷达和拉曼激光雷达三种测量原理。米散射激光雷达测量原理是利用出射激光和大气中空气分子产生的瑞利散射,以及出射激光与大

气中气溶胶与云粒子间的米散射实现对大气气溶胶和云粒子光学特征的测量功能<sup>[7]</sup>。公式(1)、(2)给出了其数据反演方法,该方法中,首先由探空资料或大气模式得到空气分子的后向散射系数  $\beta_m(z)$  和消光系数  $\alpha_m(z)$ ;其次将气溶胶消光后向散射系数比  $S_1$  取某一经验常数;最后假设一标定高度  $z_c$  和  $\alpha_a(z_c)$  标定值。至此利用上述条件,便可以由下列公式得到不同高度气溶胶消光系数  $\alpha_a(z)$ 。

(1) 后向积分式: ( $z < z_c$ )

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp \left[ 2(S_1/S_2 - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + (S_1/S_2) \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z'') \cdot \exp \left[ 2(S_1/S_2 - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right] dz''} \quad (1)$$

(2) 前向积分式: ( $z > z_c$ )

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp \left[ -2(S_1/S_2 - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + (S_1/S_2) \alpha_m(z_c)} - 2 \int_z^{z_c} X(z'') \cdot \exp \left[ -2(S_1/S_2 - 1) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right] dz''} \quad (2)$$

式中:  $S_2$  为分子的消光后向散射系数比,等于  $8\pi/3$ ;  $X(z) = P(z)z^2$ ;  $z_c$  为标定高度,并假设已知  $z_c$  处气溶胶的消光系数或散射比(边界值)。

偏振激光雷达测量原理是利用线偏振激光和大气中不同形状粒子间相互作用所产生散射光的退偏振特性来研究粒子的形态特征,是研究卷云和沙尘气溶胶等非球形粒子形态的有效方法<sup>[8]</sup>。其退偏振波比  $\delta(z)$  可通过公式(3)计算得到:

$$\delta(z) = \frac{P_s/k_s}{P_p/k_p} = k \frac{P_s}{P_p} \quad (3)$$

式中:  $P_p$  和  $P_s$  分别表示激光雷达接收到的后向散射光在高度  $z$  处回波功率的平行和垂直分量;  $k_p$  和  $k_s$  分别表示平行分量探测通道和垂直分量探测通道的系统常数,其数值和系统配置相关,通常通过实验进行标定。

拉曼激光雷达测量原理是利用出射激光与大气中空气分子相互作用产生的拉曼散射信号来实现大气气溶胶和云光学特性的定量测量<sup>[9-12]</sup>。之所以说是定量测量是因为空气分子产生的拉曼散射信号中只包含气溶胶和云的消光系数,而没有包含它们的后

向散射系数,因此在拉曼激光雷达数据反演中无需假设米散射激光雷达数据反演中所必须的消光后向散射比,也称之为激光雷达比。拉曼激光雷达的数据反演方法如公式(4)~(6)所示。

$$\alpha_{a0}(z) = \frac{1}{1 + (\lambda_0/\lambda_R)^k} \cdot \left[ \frac{d}{dz} \ln \left( \frac{N(z)}{P_R(z)z^2} \right) - [1 + (\lambda_0/\lambda_R)^4] \alpha_{m0}(z) \right] \quad (4)$$

式中:  $\alpha_{a0}(z)$  为不同高度  $z$  处发射激光波长的气溶胶和云消光系数;  $\lambda_0$  和  $\lambda_R$  分别为出射激光波长和拉曼散射光波长;  $N(z)$  为产生拉曼散射波长空气分子的数密度;  $P_R(z)$  为激光雷达测量的拉曼散射光功率;  $\alpha_{m0}(z)$  为不同高度  $z$  处发射激光波长的空气分子的消光系数。由此可见,无需任何假设条件,仅仅通过测量获得的拉曼散射信号便可以反演得到气溶胶和云的消光系数:

$$R_{a0}(z) = \frac{P_0(z)/P_R(z)}{P_0(z_{ref})/P_R(z_{ref})} R_{ref} \cdot \exp \left[ \int_z^{z_{ref}} [\alpha_{aR}(z') + \alpha_{mR}(z')] dz' - \int_z^{z_{ref}} [\alpha_{a0}(z') + \alpha_{m0}(z')] dz' \right]$$

$$\beta_{a0}(z) = [R_{a0}(z) - 1] \beta_{m0}(z) \quad (5)$$

式中： $R_{a0}(z)$ 和 $\beta_{a0}(z)$ 分别为不同高度 $z$ 处发射激光波长的气溶胶和云的散射比和后向散射系数； $P_0(z)$ 和 $P_R(z)$ 分别为激光雷达测量的米散射光和拉曼散射光功率； $\alpha_{aR}(z)$ 和 $\alpha_{mR}(z)$ 为不同高度 $z$ 处拉曼散射波长的气溶胶与云的消光系数和空气分子消光系数； $\alpha_{a0}(z)$ 和 $\alpha_{m0}(z)$ 为不同高度 $z$ 处出射激光波长气溶胶和云的消光系数和空气分子消光系数。 $z_{ref}$ 和 $R_{ref}$ 分别表示标定高度以及标定高度气溶胶的散射比。公式(5)可以看出拉曼激光雷达测量气溶胶和云后向散射系数不用假设消光后向散射比 $S_1$ ，因此其测量精度要优于米散射激光雷达。

既然拉曼激光雷达定量获取气溶胶和云的消光系数 $\alpha_{a0}(z)$ 与后向散射系数 $\beta_{a0}(z)$ ，那么利用公式(6)便很容易得到另一个气溶胶和云非常重要的光学参量——消光后向散射比 $S_1(z)$ 。 $S_1(z)$ 和气溶胶与云粒子的大小、形状以及化学组成息息相关，因此可用于区分气溶胶和云的种类，以及对米散射激光雷达数据反演中 $S_1$ 假设值提供参考<sup>[5-6]</sup>：

$$S_1(z) = \alpha_{a0}(z) / \beta_{a0}(z) \quad (6)$$

## 2 系统介绍

图 1 给出了拉曼-米散射激光雷达产品结构示意图和外观图。该产品采用 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 线偏振激光作为探测光源。后继光学与探测单元由三个探测通道组成，其中拉曼探测通道用于测量 532 nm 出射激光与空气中氮气分子作用产生的 607 nm 拉曼散射信号，垂直探测通道用于测量 532 nm 出射激光与大气中粒子作用产生的米散射信号垂直分量，水平探测通道用于测量 532 nm 出射激光与大气中粒子作用产生的米散射信号水平分量。利用三个探测通道的测量数据并结合上述反演方法便可得到对流层气溶胶和云光学参数垂直分布特征。

为方便运输，拉曼-米散射激光雷达产品采用一体化设计，整体大小为 0.7 m×0.7 m×1 m (长×宽×高)，如图 1(b)所示。试验期间，该产品无需安装调试，仅仅外接 220 V 电源便可工作。产品的一键式启动功能确保系统在按下工作按钮后便自动完成所有

器件的开启和自检，而用户只需通过控制界面对产品进行参数设定和操作。此外，用户还可通过产品网线接口进行远程操作和数据传输。

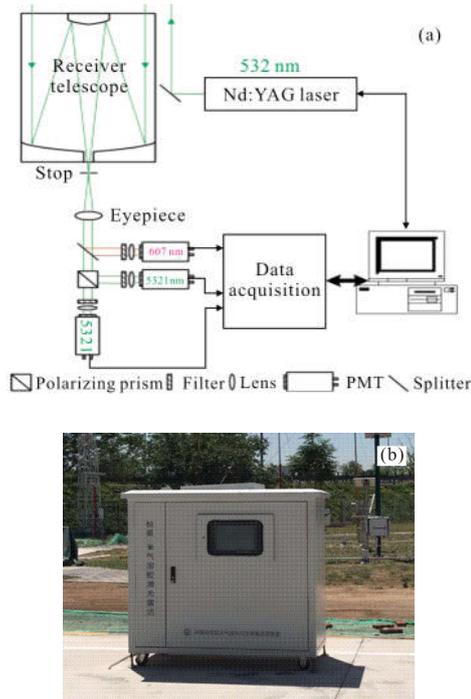


图 1 拉曼-米散射激光雷达产品结构示意图(a)和外观图(b)  
Fig.1 Structural schematic and appearance of Raman-Mie scattering lidar

除了整体结构和系统控制方面，该产品在数据处理方面也有显著提升。针对激光雷达数据处理自身特点，产品包含自动和人工两种数据反演软件。自动反演软件主要应用于无须人为干预的数据处理中，譬如距离订正回波信号、退偏振比以及大气水平能见度等数据的获取。人工反演软件主要应用于需要用户根据实际大气状况调节反演参数进行的数据处理中，譬如云天气条件下的气溶胶消光系数反演，沙尘、雾、霾和污染等特殊天气条件下气溶胶光学特性的反演等。自动反演软件可以快速直观地描述测量期间整体大气状况的时空变化特征，而人工反演软件则可以对用户根据自动反演结果显示的兴趣观测部分进行进一步细致定量研究。同时，自动反演软件和自动测量程序相结合，可在无人干预条件下实现自动测量和数据反演，并将反演结果以图片形式保存，便于用户日后分析研究。表 1 列出了拉曼-米散射激光雷达产品的主要参数、性能指标和测

量内容。

表 1 拉曼-米散射激光雷达产品的主要参数、性能指标和测量内容

Tab.1 Main specifications, performance and measurement of Raman-Mie scattering lidar

Parameter	Value
Laser wavelength/nm	532
Laser frequency/Hz	10
Laser single pulse energy/mJ	150
Diameter of receiving telescope/mm	220
Receiving angle of view/mrad	0.5-2(Adjustable)
Detection channels	Three
Filter bandwidth/nm	1
Data collection method	A/D and photon counting
Performance	Parameters
	0-18 km(Clear air) 7.5 m
Effective measurement range	8 min(Adjustable)
Spatial resolution	5-40 °C(For temperature control, -10-40 °C)
Time resolution	5-70 °C(For temperature control, -30-70 °C)
Operating temperature	Manual, automatic, and network control
Storage temperature	220 V/50 Hz/1 500 W
Way of working	0.7 m×0.7 m×1 m(Length×width×height) <80 kg
Measurement	Content
	Atmospheric visibility Aerosol level distribution Aerosol boundary layer structure. Tropospheric aerosols and cloud structures, particle morphology and optical characteristics
Level measurement	Tropospheric aerosol species identification, discriminant
Vertical measurement	

### 3 测量结果

图2 显示拉曼-米散射激光雷达产品在 2016-8-10 至 2016-8-15 六天连续自动测量和自动反演结果。图中横坐标为时间,纵坐标为探测高度,测量时间间隔为 30 min, 空间分辨率为 7.5 m。图 2 中

Range Corrected Signal at 532 nm 代表距离订正米散射信号, 其颜色大小代表气溶胶和分子后向散射强度。该图很好地显示测量期间 0~18 km 高度范围内整体大气状况,在 3 km 高度以下,由于受到气溶胶的影响其信号强度很大,3 km 高度以上没有云存在的区域,回波信号较小,而在有云存在的区域则回波信号较大。2016-8-12 前为晴朗无云天气,2016-8-12 至 2016-8-15 期间 12 km 高度上一直存在高云,后期 3~12 km 高度存在中低云,2016-8-15 以后以多云天气为主并伴有降雨。

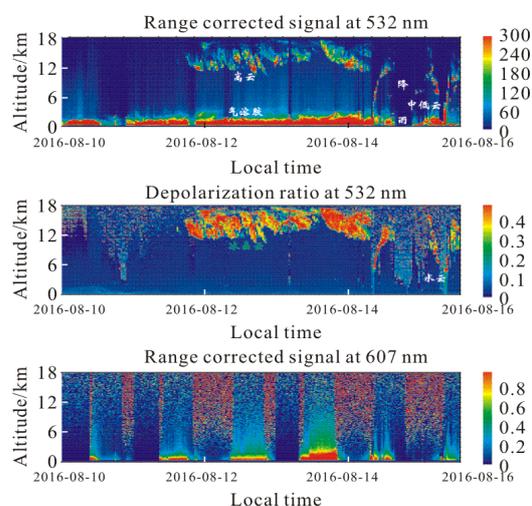


图 2 拉曼-米散射激光雷达产品自动测量与自动反演结果  
Fig.2 Result of measurement and inversion automatically by Raman-Mie scattering lidar

图 2 中 Depolarization Ratio at 532 nm 代表退偏振比, 是激光雷达垂直探测信号和平行探测信号的比值。退偏振比反映大气中散射粒子的形状信息, 主要用于区分球形粒子 (污染气溶胶、雾和水云等) 和非球形粒子 (沙尘和冰晶云等)。借助于退偏振比可以看出, 由于近距离气溶胶粒子为近似球形粒子, 其退偏振比很小。冰晶云由于是非球形粒子, 因此其退偏振比较大。借助图中退偏振比测量结果可以很清楚地将云和气溶胶, 以及水云和冰晶云区别开来。如果测量期间出现沙尘, 则退偏振比测量也可以将沙尘很好地识别。

图 2 中 Range Corrected Signal at 607 nm 代表氮气拉曼回波信号, 主要用于定量测量气溶胶和云的光学特性。如上提及, 由于拉曼信号不受气溶胶和云后向散射系数影响, 只和气溶胶和云消光系数相

关联, 因此利用拉曼信号可直接测量气溶胶和云的消光系数, 以及和米散射信号结合得到后向散射系数和消光后向散射比。图中不同时间拉曼信号颜色的差别直接表示拉曼信号的大小, 可直观上判断何时近地面气溶胶浓度多, 何时浓度少。虽然拉曼激光雷达在数据处理上比米散射激光雷达有较大优势, 但由于拉曼信号很弱, 易受白天背景光的影响, 因此白天的探测高度很低, 且信噪比较差, 一般仅用于夜晚观测。

图 3 给出了 2016-8-12 00:00 时分利用人工反演软件得到的气溶胶消光系数垂直分布, 其中红线为空气分子消光系数。图中左侧为反演方法中所涉及的参数设置, 用户可自行调节, 右侧为反演结果显示。可以看出, 该时刻大气气溶胶消光在 4 km 以下均小于分子消光, 在 8 km 高度左右气溶胶消光系数最小, 8 km 以上高度气溶胶消光和分子消光相接近。在 12~14 km 高度范围, 由于存在卷云, 其消光最大达到近  $0.1 \text{ km}^{-1}$ 。图 3 测量结果很好表示, 即使在高云存在天气条件下, 该激光雷达反演结果仍然达到 18 km 高度以上, 具备对流层整层气溶胶和云光学特性的探测能力。

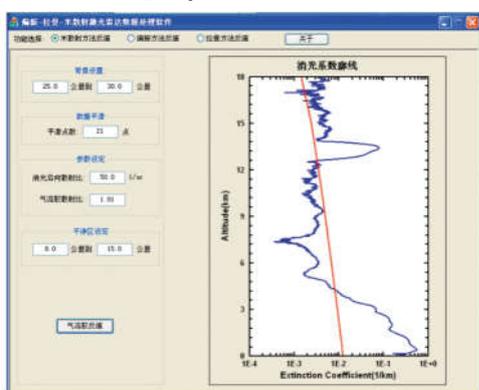


图 3 拉曼-米散射激光雷达产品人工反演软件结果

Fig.3 Result of manual inversion software by Raman-Mie scattering lidar

图 4 给出了 2016-8-12 00:00 时分利用拉曼和偏振方法得到的气溶胶后向散射系数、消光系数、激光雷达比和退偏振比垂直分布。由于系统几何因子影响, 0.5 km 以下数据并未订正。图中可以看出, 0.5 km 以上后向散射系数和消光系数变化趋势相同, 消光系数从近距离  $0.5 \text{ km}^{-1}$ ~3 km 附近逐渐衰减至零。消光系数廓线上的误差直接来源于激光雷

达测量信号, 非常有利于雷达测量数据的质量控制。图 4 中的激光雷达比在除 2.5 km 位置外随高度近乎常数  $75 \text{ sr}$ , 2.5 km 处的变化有可能是气溶胶粒子微物理特征发生变化, 或者是信噪比小造成消光系数测量数值偏小所致。退偏振比廓线随高度近乎没有变化, 均在 0.05 左右, 说明该天气溶胶为球形粒子。根据图 4 测量结果可以看出, 该天气溶胶主要集中在 3 km 高度, 其整个气溶胶层以球形小粒子, 且具有较强光吸收特性的气溶胶粒子为主。由此不难看出, 借助于拉曼和偏振方法得到的气溶胶光学特性可用于实现对近地面气溶胶种类的判别。

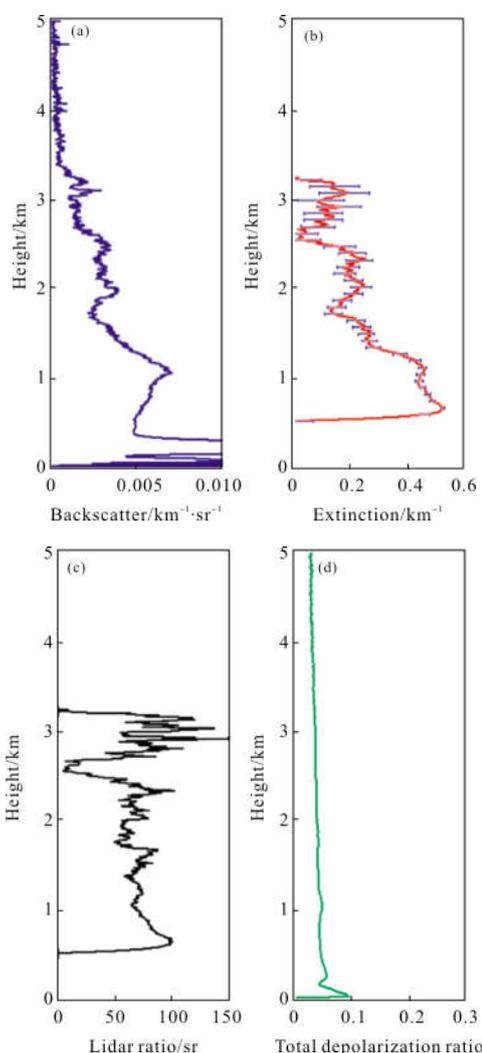


图 4 2016-8-12 00:00 时分气溶胶后向散射系数、消光系数、激光雷达比和退偏振比垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of aerosol backscatter coefficient, extinction coefficient, lidar ratio and depolarization ratio in August 12, 2016 00:00

## 4 结 论

文中介绍应用于大气气溶胶污染监测的最新拉曼-米散射激光雷达。不同于传统的单波长单通道米散射激光雷达系统,该系统同时配备了 532 nm 退偏振探测和拉曼探测功能。退偏振探测功能可有效测量大气中气溶胶粒子的光学退偏振信息,反映出气溶胶粒子的形状特征,有利于识别球形粒子为主的污染型气溶胶和非球形粒子为主的沙尘和扬尘等自然形气溶胶。而拉曼探测功能,一方面可通过拉曼信号定量获取气溶胶粒子的消光系数廓线,不受传统米散射激光雷达反演中涉及的标定高度和激光雷达比假设所带来的误差;另一方面可以结合米散射信号反演得到气溶胶粒子的后向散射系数廓线和激光雷达比廓线,反映出气溶胶粒子的大小、形状和组成等微物理特征,有利于对局地气溶胶粒子的光学和微物理参数间进行统计分析。

为进一步满足气溶胶污染监测的业务化需求,该激光雷达系统着重在结构一体化、控制自动化、开机一键化、操作网络化以及反演定量化等多方面进行了产品化设计,进一步提高激光雷达系统在环境监测领域的应用能力。实际测量结果显示,该产品可对气溶胶边界层和近地面至 18 km 高度范围的气溶胶与云光学特性进行自动连续观测,并可利用其偏振和拉曼测量功能实现对气溶胶和云种类进行判别,非常适合应用于大气污染环境监测和大气科学等研究领域。

## 参考文献:

- [1] Shang Zhen, Xie Chenbo, Wang Bangxin, et al. Pure rotational Raman lidar measurements of atmospheric temperature near ground in Beijing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1030001. (in Chinese)  
尚震, 谢晨波, 王邦新, 等. 纯转动拉曼激光雷达探测北京地区近地面大气温度[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1030001.
- [2] Xu Jiwei, Liu Dong, Xie Chenbo, et al. Multi-wavelength fitting simulation and inversion of atmospheric aerosol spectrum distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001006. (in Chinese)  
徐继伟, 刘东, 谢晨波, 等. 大气气溶胶谱分布的多波长拟合模拟反演研究[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001006.
- [3] Shang Zhen, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1211003. (in Chinese)  
尚震, 谢晨波, 钟志庆, 等. 用于测量对流层水汽的拉曼激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1211003.
- [4] Liu Yuli, Xie Chenbo, Shang Zhen, et al. Retrieval and analysis of atmospheric temperature using a rotational raman lidar observation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1978-1986.
- [5] Tao Zongming, Shan Huihui, Zhang Hui, et al. Development of lidar system based on one wavelength emission and five channel receivers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1030002. (in Chinese)  
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.
- [6] Tian Xiaomin, Liu Dong, Xu Jiwei, et al. Review of lidar technology for atmosphere monitoring[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(6): 401-416. (in Chinese)  
田晓敏, 刘东, 徐继伟, 等. 大气探测激光雷达网络和星载激光雷达技术综述 [J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(6): 401-416.
- [7] Spinhirne J D. Micro pulse lidar[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1993, 31: 48-55.
- [8] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 24(5): 1609-1613.
- [9] Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1991, 72: 1848-1866.
- [10] 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]. *Appl Phys B*, 1992, 55: 18-28.
- [11] 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)
- [12] Xie Chenbo, Nishizawa T, Sugimoto N, et al. Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing [J]. *China Appl Opt*, 2008, 47: 4945-4951.