

气溶胶激光雷达比的迭代反演

宋跃辉 时丽丽 王玉峰 鲁雷雷 华灯鑫

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 基于Fernald法研究了激光雷达比设定值与激光雷达有效探测范围内气溶胶光学厚度之间的函数关系。针对函数的连续性,提出了以光学厚度为收敛判据,采用二分法反演低层气溶胶激光雷达比的新方法。2014年7月下旬,利用太阳光度计和西安理工大学自主研发的拉曼-米氏激光雷达对西安局部地区大气进行了实验观测,并利用所提出的方法进行了数据反演。实验结果表明,西安局部地区气溶胶激光雷达比在观测期间比较平稳,基本为44或45。降雨当天,受大气湿度影响,激光雷达比值较大为51。利用激光雷达米氏散射回波信号和太阳光度计探测数据,提出了采用迭代反演算法开展气溶胶激光雷达比精细反演新方法,对研究气溶胶光学特性的精细反演算法具有重要的意义。

关键词 大气光学; 气溶胶; 激光雷达比; 迭代法

中图分类号 TN958.98; TP721.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0113001

Retrieve of Lidar Ratio of Aerosols by Iteration

Song Yuehui Shi Lili Wang Yufeng Lu Leilei Hua Dengxin

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Based on Fernald method, the function relation between the set value of the lidar ratio and the optical depth of aerosols within the lidar detection range is studied. In view of the continuity of the function, the new algorithm for retrieving low layer aerosol lidar ratio is proposed, in which the dichotomy is used and the optical depth of aerosols is the convergent criterion. In late July 2014, the sun photometer and the self-developed Raman-Mie lidar are used to detect the atmosphere in Xi'an. Then the proposed algorithm is used to retrieve the lidar ratio and the extinction coefficient. The experimental results show that, the lidar ratio of aerosols in Xi'an is relatively stable during the observation period, the value is 44 or 45. Due to the impact of atmospheric humidity the lidar ratio is larger in the day of rain, the value is 51. The fine retrieving of aerosols lidar ratio is accomplished by iteration, and in the iteration only the Mie scattering signal of lidar and the detection data of sun photometer are used. This is very important for studying the fine retrieve algorithm of aerosol's optical characteristics.

Key words atmospheric optics; aerosol; lidar ratio; iteration

OCIS codes 010.1290; 010.0280; 280.1100; 280.3640; 290.2200

1 引 言

大气气溶胶是指由大气介质和混合于其中的固体或液体微粒所组成的多相体系。气溶胶来源广泛、成分复杂,对人类健康和生存环境有着非常重要的影响,已成为大气科学领域的研究热点^[1]。激光雷达能够实现气溶胶消光系数、粒谱分布、形状等参数的大范围实时监测,是大气遥感探测的重要工具和手段^[2]。

激光雷达比是气溶胶消光系数和后向散射系数的比值,与气溶胶的复折射率、粒谱分布和形状有关。

收稿日期: 2015-08-18; 收到修改稿日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61405158, 61308105)、陕西省教育厅基金(11JK0909)

作者简介: 宋跃辉(1980—),男,博士研究生,讲师,主要从事偏振激光雷达方面的研究。E-mail: songyuehui@xaut.edu.cn

导师简介: 华灯鑫(1964—),男,博士,教授,主要从事激光雷达遥感探测技术及光电检测技术等方面的研究。

E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn(通信联系人)

同时,激光雷达比也是采用 Fernald 法求解米氏散射激光雷达方程时需要设定的关键未知参数,对消光系数的反演有非常重要的影响^[5-7]。然而目前求解米氏散射激光雷达方程时,通常需要根据天气条件对激光雷达比进行适当假设,这显然不利于气溶胶光学特性的精细反演。

为反演不同高度处气溶胶的激光雷达比,国内外主要采用高光谱分辨率激光雷达和拉曼-米氏激光雷达进行了实验研究。高光谱分辨率激光雷达采用高光谱分辨率分光元件分离气溶胶的米氏散射回波信号和大气分子的瑞利散射回波信号。而拉曼激光雷达在接收气溶胶米氏散射回波信号的同时,要能够有效提取氮气的拉曼回波信号。分光系统设计和微弱光信号检测是高光谱分辨率激光雷达和拉曼-米氏激光雷达的难点和技术关键。2001年, Hair 等^[8]搭建了高光谱激光雷达,该系统采用种子注入激光器,利用碘吸收法分离大气分子和气溶胶散射。2002年, Zhao 等^[9]利用高光谱分辨率激光雷达和拉曼-米氏激光雷达观测了亚洲地区灰尘的激光雷达比。2010年, Choi 等^[10]同时采用转动拉曼激光雷达和振动拉曼激光雷达反演了气溶胶激光雷达比。2013年, Su 等^[11]组合应用拉曼-米氏散射激光雷达和多波长激光雷达,提出了一种多波长激光雷达比的数据反演方法,同年, Lopes 等^[12]利用地基激光雷达和太阳光度计对 CALIPSO 数据反演中激光雷达比的取值进行了评估和验证。在国内,武汉大学张金业等^[13]和中国科学院安徽光学精密机械研究所吴德成等^[6]先后于2010年和2011年研制了拉曼-米氏雷达系统,并反演了当地气溶胶的激光雷达比。2015年,西安理工大学王玉峰等^[14]研制了多参数探测拉曼-米氏激光雷达系统,可实现大气温、湿度和气溶胶的同步探测。

尽管拉曼-米氏激光雷达和高光谱分辨率激光雷达能够实现不同高度气溶胶激光雷达比的有效探测,但二者分光系统复杂、回波信号微弱、探测距离短、信噪比低,这限制了二者的实际应用。米氏散射激光雷达成本低、结构简单、操作方便,得到了广泛应用。事实上,某些实验站点除米氏散射激光雷达外并未配备其他激光雷达系统。在此情况下,结合米氏散射激光雷达和其他常规探测手段反演激光雷达比,为 Fernald 法中激光雷达比的设定提供依据,对气溶胶的精细反演具有重要的意义。鉴于此本文提出了一种以气溶胶光学厚度(OD)为收敛判据,通过迭代反演激光雷达比的新方法。该方法只需米氏散射激光雷达和太阳光度计,硬件系统简单,算法简捷有效。

2 算法原理

2.1 Fernald 法

米氏散射激光雷达方程可表示为

$$P(R) = kP_L R^{-2} [\beta_m(R) + \beta_a(R)] \exp\left\{-2 \int_0^R [\sigma_m(R') + \sigma_a(R')] dR'\right\}, \quad (1)$$

式中 $P(R)$ 为 R 高度处回波信号强度, k 为系统常数, P_L 为激光器单脉冲能量, $\beta_m(R)$ 、 $\beta_a(R)$ 分别为大气分子和气溶胶的后向散射系数, $\sigma_m(R)$ 、 $\sigma_a(R)$ 分别为大气分子和气溶胶的消光系数。

定义气溶胶和大气分子的激光雷达比为

$$S_a = \frac{\sigma_a(R)}{\beta_a(R)}, \quad (2)$$

$$S_m = \frac{\sigma_m(R)}{\beta_m(R)}. \quad (3)$$

在 Fernald 法中,假设激光雷达比已知且不随高度变化。同时如果参考高度 R_c 处大气分子和气溶胶的消光系数已知,将(2)式、(3)式代入(1)式,即可反演参考高度以下气溶胶的消光系数,表示为

$$\sigma_a(R) = -\frac{S_a}{S_m} \sigma_m(R) + \frac{S(R) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_R^{R_c} \sigma_m(R') dR'\right]}{\frac{S(R_c)}{\sigma_a(R_c) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(R_c)} + 2 \int_R^{R_c} S(R') \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_{R'}^{R_c} \sigma_m(R'') dR''\right] dR'}, \quad (4)$$

式中 $S(R) = P(R)R^2$ 为距离平方校正信号。

反演过程中,大气分子的激光雷达比为 $8\pi/3$; 而气溶胶的激光雷达比要依天气条件而定,一般取值范围为 20~100; 355 nm 波长的激光雷达比可取为 50^[15-16]。当探测距离较远时,参考高度可选几乎不含气溶胶粒

子的大气层。

2.2 光学厚度反演

1) 利用激光雷达数据反演

利用 Fernald 法反演消光系数之后即可通过积分计算激光雷达有效探测范围内气溶胶的光学厚度 L_{OD} :

$$L_{OD} = \int_0^{R_{max}} \sigma_a(R) dR, \quad (5)$$

式中 R_{max} 为激光雷达最大探测高度。

2) 利用太阳光度计数据反演

设太阳光度计探测的整层大气光学厚度为 S_{ODA} , 则有效探测范围内气溶胶的光学厚度还可表示为

$$S_{OD} = S_{ODA} - \int_{R_{max}}^{\infty} \sigma_a(R) dR - \int_0^{\infty} \sigma_m(R) dR. \quad (6)$$

为了与(5)式区分,由太阳光度计反演的光学厚度记为 S_{OD} 。太阳光谱区的大气消光主要来自于大气分子和气溶胶的散射和吸收,大部分气溶胶聚集在 0~5 km 的低层大气,气溶胶消光也主要源于这一层^[17]。在 5 km 以下,气溶胶的消光通常大于大气分子的消光,随着高度的增加大气分子的消光逐渐占主导地位^[17]。鉴于此本文认为气溶胶主要集中在 5 km 以下,而 5 km 以上气溶胶颗粒较少,可忽略不计。因此当最大探测高度大于 5 km 时,(6)式可简化为

$$S_{OD} = S_{ODA} - \int_0^{\infty} \sigma_m(R) dR. \quad (7)$$

综上所述,如果激光雷达探测高度 R_{max} 大于 5 km,则可利用太阳光度计和标准大气模型计算激光雷达有效探测范围内气溶胶的光学厚度 S_{OD} 。

2.3 迭代算法及其收敛性

由 2.2 节的内容可知,两种探测有效范围内气溶胶光学厚度的方法相互独立,因此两种方法可以相互印证,理论上讲 L_{OD} 等于 S_{OD} ,这也是本文利用迭代法反演激光雷达比的基础。

将(2)式代入(1)式得

$$P(R) = kP_1 R^{-2} \left[\beta_m(R) + \frac{\sigma_a(R)}{S_a} \right] \exp \left\{ -2 \int_0^R [\sigma_m(R) + \sigma_a(R)] dR \right\}, \quad (8)$$

式中气溶胶激光雷达比 S_a 为参变量,消光系数 $\sigma_a(R)$ 为待求解变量。 S_a 取确定值时,便可利用 Fernald 法求解 $\sigma_a(R)$,进而通过积分反演有效探测范围内的光学厚度 L_{OD} 。显然,对应确定的 S_a 总有确定的 L_{OD} 与之对应,因此 L_{OD} 和 S_a 之间存在函数关系。

定义光学厚度与激光雷达比之间的函数关系为 $L_{OD}(S_a)$ 。(8)式为多个连续函数的乘积,因此只要 $\sigma_a(R)$ 不发生突变(无湍流), $L_{OD}(S_a)$ 就是 S_a 的连续函数。

建立方程如下:

$$L_{OD}(S_a) - S_{OD} = 0, \quad S_a \in [20, 100]. \quad (9)$$

显然,(9)式在[20, 100]之内的解就是气溶胶的激光雷达比。综合考虑 $L_{OD}(S_a)$ 的连续性和 S_a 的取值范围,采用二分迭代法求解该方程。算法流程如图 1 所示,由介值定理可知,如果函数 $f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 连续,且 $f(a), f(b)$ 异号,那么在开区间 (a, b) 内 $f(x)$ 至少有一个零点。因此如果在指定闭区间内存在两点 S_{a1}, S_{a2} ,使得 $L_{OD}(S_{a1})$ 大于 $S_{OD}, L_{OD}(S_{a2})$ 小于 S_{OD} ,那么该迭代算法必然收敛。

3 观测与数据分析

3.1 实验观测

2014年7月下旬,西安经历了多云、降雨和晴天等不同天气过程。在此期间利用 CE318 型太阳光度计和西安理工大学自主研发的拉曼-米氏激光雷达^[14]对西安局部地区进行了实验观测。CE318 型太阳光度计可实现 9 个不同波段整层大气光学厚度的自动观测。拉曼-米氏激光雷达系统中激光器的波长为 355 nm,单脉冲能量为 150 mJ,重复频率为 20 Hz,脉宽为 10 ns,望远镜有效接收直径为 250 mm,详细结构及参数见文献[14],利用该激光雷达系统可获得气溶胶的米氏散射回波信号。实验中激光雷达的积分时间为 8.3 min,脉冲数目为 10000。为保证探测高度大于 5 km,观测实验在夜间进行。

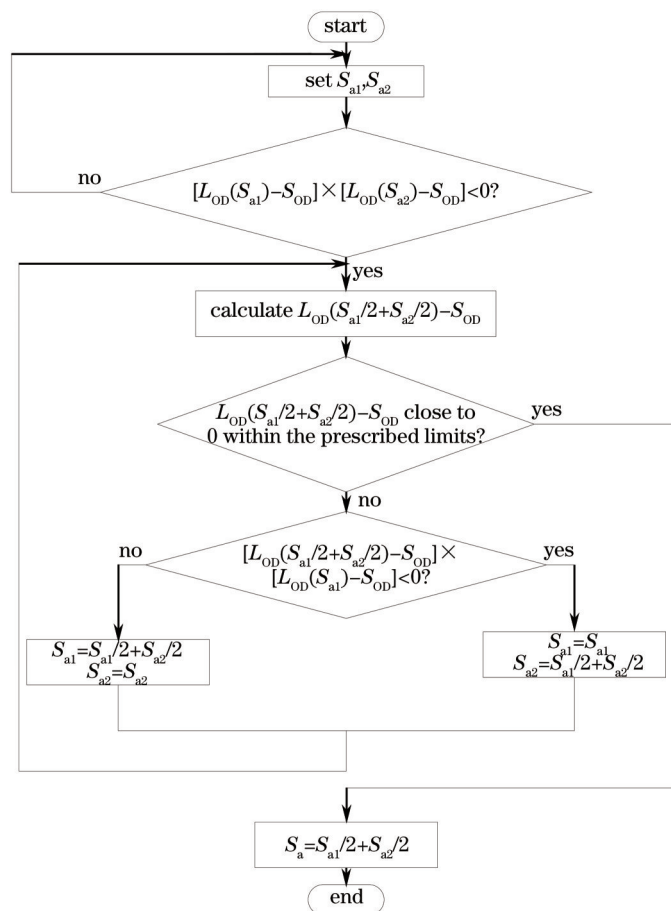


图1 二分迭代法流程图

Fig.1 Flowchart of dichotomy

3.2 单次反演

2014年7月29日西安多云,激光雷达米氏散射回波信号的距离平方校正信号如图2所示。本文采用文献[18]所提出的激光雷达探测盲区校正方法对激光雷达盲区内的信号进行了校正,确保了低层及近地表层激光雷达回波信号的有效性^[18],并取系统信噪比为10的高度为最大探测高度,即远场7.5 km高度。因此,经盲区校正后系统的有效探测范围为0~7.5 km。

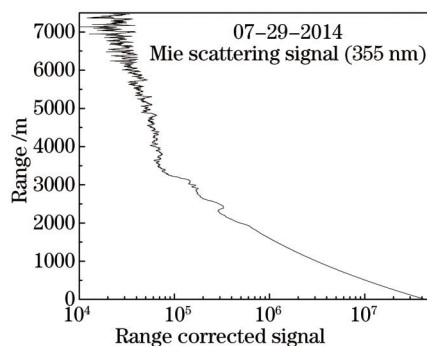


图2 激光雷达回波信号的距离平方校正信号

Fig.2 Range corrected signal of lidar return

当天太阳光度计观测到340 nm波长的大气平均光学厚度为2.987。同时鉴于355 nm和340 nm非常接近,以及本文旨在研究利用迭代法反演激光雷达比的可行性,因此,本文假设当天355 nm波长的光学厚度也为2.987。根据美国大气标准大气模型和(7)式,可知激光雷达有效探测范围内(0~7.5 km)气溶胶的光学厚度为2.408。在后续的激光雷达比迭代反演中该值是收敛依据。

激光雷达比迭代初始值分别取为 20 和 100, 迭代过程中, 激光雷达比只取整数值, 并选取光学厚度最接近 2.408 时所对应的激光雷达比为终值。利用 Fernald 法反演气溶胶消光系数时, 参考高度取为 7.5 km。迭代过程中的激光雷达比和光学厚度如图 3、图 4 所示。经过 8 次迭代算法结束, 激光雷达比的迭代值为 44; 利用该激光雷达比反演的光学厚度为 2.406。以太阳光度计反演的光学厚度(2.408)为真值, 则光学厚度的绝对误差为 -0.002, 相对误差为 -0.08%。如果根据经验设定激光雷达比为 50, 则有效探测范围内的光学厚度为 2.454, 绝对误差为 0.046, 相对误差为 1.91%, 远高于激光雷达比取 44 时的相对误差。这从一方面验证了算法的有效性。

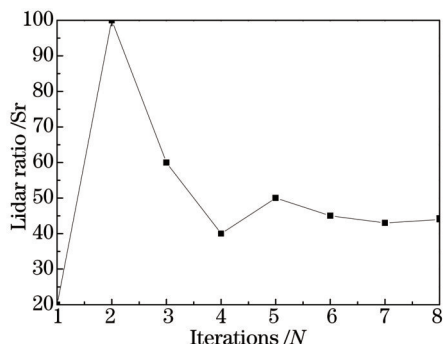


图 3 迭代过程中的激光雷达比

Fig.3 Lidar ratio in iteration

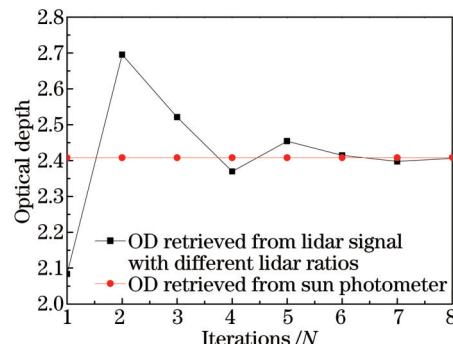


图 4 迭代过程中的光学厚度

Fig.4 Optical depth in iteration

为进一步验证该迭代解的有效性, 研究了激光雷达比在闭区间[20,100]内连续变化时光学厚度的变化规律, 结果如图 5 所示。显然, 此次数据反演中, 光学厚度随激光雷达比增加单调上升, 这更说明了迭代法的收敛性和迭代解的唯一性。

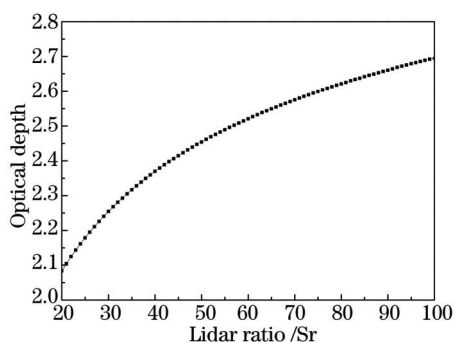


图 5 激光雷达比取不同值时反演的光学厚度

Fig.5 Optical depth retrieved with different lidar ratios

激光雷达比分别取 44(迭代值)和 50(经验值)的情况下消光系数的反演结果如图 6(a)所示。当激光雷

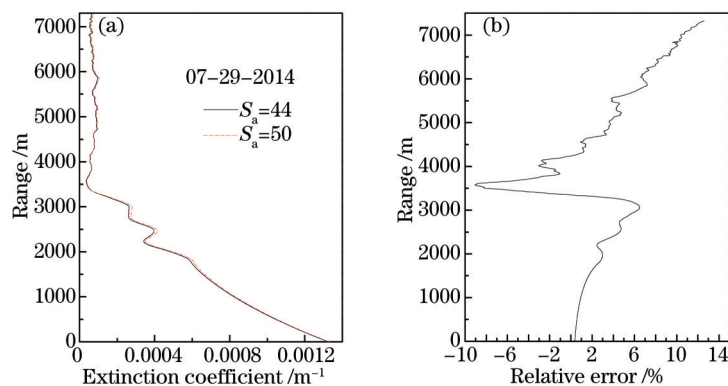


图 6 (a) 激光雷达比取不同值时的消光系数及(b) 消光系数的相对误差

Fig.6 (a) Extinction coefficient retrieved with different lidar ratios and (b) relative error of the extinction coefficient

达比取不同值时,所反演消光系数的变化趋势基本一致,但二者之间仍有一定的差距。如果以激光雷达比取44时的消光系数作为真值,激光雷达比取50时的消光系数相对于真值的相对误差如图6(b)所示,相对误差最大达到了13%。可见激光雷达比对消光系数有很重要的影响。

3.3 连续观测

2014年7月下旬的实验观测结果如表1所示。实验期间,激光雷达系统的参数设置保持不变,Fernald法中的参考高度一致取为7.5 km。7月22日之前西安地区连续高温晴天,7月23日和24日均为阵雨天气,25日之后天气以晴或多云为主。由表1可知,2014年7月下旬西安地区激光雷达比基本为44或45,比较稳定,而7月24日激光雷达比为51,相对偏高。降雨当天空气湿度大,导致气溶胶复折射率虚部增加、球形特性增强,都是7月24日激光雷达比相对偏高的可能原因。

表1 2014年7月下旬的实验观测结果

Table 1 Experimental results in late July 2014

Date	Weather	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Optical depth retrieved with sun photometer	Lidar ratio retrieved by iteration /Sr
07-22	Cloudy	37~27	1.483	45
07-24	Shower	33~21	2.185	51
07-26	Sunny	35~22	2.132	44
07-29	Cloudy	35~25	2.408	44
07-30	Sunny	37~26	2.141	45

与经验值(50)相比,2014年7月下旬西安地区气溶胶激光雷达比相对偏低,这与天气情况、季节规律等有关,其间的规律性有待深入研究。依据迭代的激光雷达比反演的消光系数如图7所示。

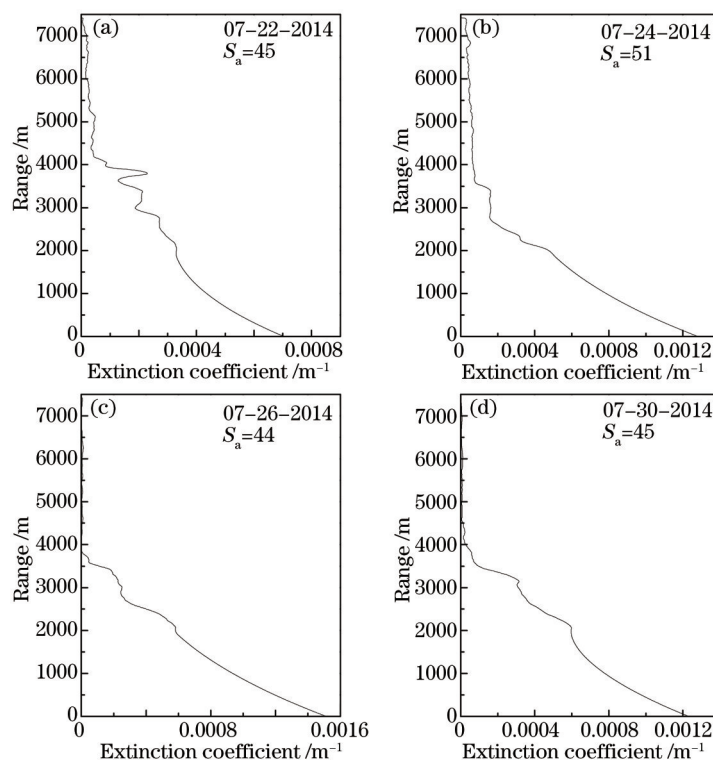


图7 2014年7月下旬的激光雷达比和消光系数

Fig.7 Lidar ratio and extinction coefficient in late July 2014

4 结 论

提出了采用二分法迭代反演激光雷达比的新方法,该方法以光学厚度为收敛条件,保证了激光雷达比迭代的合理性。依托西安理工大学激光雷达遥测研究中心的实验设备进行了实验观测,实验结果表明,除降雨当天外,2014年7月下旬西安地区激光雷达比基本为44或45。该方法仅利用激光雷达米氏散射回波信号和

太阳光度计观测数据即可有效反演低层气溶胶的雷达比,这在不具备拉曼-米氏激光雷达和高光谱分辨率激光雷达的情况下具有一定的优势,对研究气溶胶光学特性的精细反演方法具有非常重要的意义。在后续工作中将和其他激光雷达比反演方法进行对照,并深入研究激光雷达比的季节变化规律和日变化规律。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xiaoye. Aerosol over china and their climate effect[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2007, 22(1): 12-16.
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(1): 12-16.
- 2 Zhao Hu, Hua Dengxin, Di Huige, *et al.*. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0113001.
赵 虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113001.
- 3 Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(10): 1321-1324.
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比[J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1321-1324.
- 4 Wang Xiangchuan. Lidar ratios for slightly non-spherical atmospheric aerosol particles[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(2): 111-114.
王向川. 轻度非球形气溶胶粒子的激光雷达比[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(2): 111-114.
- 5 Min Min, Wang Pucui, Zong Xuemei. The intraseasonal variation of summer monsoon circulation and rainfall in east Asia [J]. *Chinese J Atmospheric Sciences*, 2010, 34(3): 506-512.
闵 敏, 王普才, 宗雪梅. 中国地区卷云消光后向散射比的星载激光雷达遥感[J]. *大气科学*, 2010, 34(3): 506-512.
- 6 Wu Decheng, Liu Bo, Qi Fudi. 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. 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.
- 7 Zhang Chaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in china[J]. *Chinese J 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.
- 8 Hair J W, Caldwell L M, Krueger D A, *et al.*. High-spectral-resolution lidar with iodine-vapor filters: Measurement of atmospheric-state and aerosol profiles[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(30): 5280-5294.
- 9 Zhao YanLiu, Sugimoto Nobuo, Murayama Toshiyuki. Extinction-to-backscatter ratio of asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(15): 2760-2767.
- 10 Sungchul Choi, Sunghoon Baik, Seungkyu Park, *et al.*. The measurement of the lidar ratio by using the rotational Raman lidar[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2010, 14(3): 174-177.
- 11 Jia Su, Zhaoyan Liu, Yonghua Wu, *et al.*. Retrieval of multi-wavelength aerosol lidar ratio profiles using Raman scattering and Mie backscattering signals[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79(1): 36-40.
- 12 F J S Lopes, E Landulfo, M A Vaughan. Assessment of the calipsolidar 532 nm version 3 lidar ratio models using a ground-based lidar and aeronet sun photometers in Brazil[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(1): 1143-1199.
- 13 Zhang Jinye, Gong Wei, Huang Chuyun, *et al.*. Measurements of aerosol optical properties by Raman lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7): 1340-1344.
张金业, 龚 威, 黄楚云, 等. Raman 激光雷达探测气溶胶光学特性[J]. *光子学报*, 2010, 39(7): 1340-1344.
- 14 Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, *et al.*. Ramanlidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328004.
王玉峰, 高 飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328004.
- 15 Liu Qiaojun, Zheng Yuchen, Zhu Jianhua, *et al.*. Ultraviolet Mie lidar operation of aerosol extinction in a dust storm case over Macao[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(3): 625-629.
刘巧君, 郑玉臣, 朱建华, 等. 利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(3): 625-629.
- 16 Zhao Yiming, Pan Chao, Wang Lidong, *et al.*. Aerosol monitoring by lidar at Wangdu, Heibei[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2015, 36(4): 64-70.
赵一鸣, 潘 超, 王丽东, 等. 激光雷达探测河北望都气溶胶[J]. *遥测遥控*, 2015, 36(4): 64-70.

17 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1991: 90.

周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. *高等大气物理学*[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 90.

18 Di Huige, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.*. Investigation on the correction of the Mie scattering lidar's overlapping factor and echo signals over the total detection range[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094215.

狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 米散射激光雷达重叠因子及全程回波信号标定技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094215.

栏目编辑: 史 敏