

文章编号: 0258-7025(2010)10-2526-07

拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层 气溶胶的光学性质

伯广宇 谢晨波 刘东 陈涛 王邦新 王珍珠 钟志庆 周军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 研制了一台拉曼-米-瑞利散射多参数大气探测激光雷达系统, 利用其拉曼-米散射通道, 实现了边界层内 532 nm 大气气溶胶消光系数、后向散射系数和消光后向散射比(激光雷达比)的定量测量。利用研制的激光雷达, 对合肥地区夏秋季气溶胶光学性质进行了常规观测, 观测结果显示, 激光雷达比垂直廓线没有明显的突变, 说明夜间近地面气溶胶混合得较均匀, 并且微物理性质相同。夏季气溶胶激光雷达比平均值为 (64.4 ± 6.1) sr, 相对较大; 秋季平均值为 (51.5 ± 5.1) sr, 相对较小; 夏秋季气溶胶激光雷达比总体变化不大。夏秋季气溶胶激光雷达比稍有不同原因, 可能与气象因素或者气溶胶组成成分略有变化有关。在夏秋各自季节内, 激光雷达比各天观测结果变化较小, 说明在同一季节内, 气溶胶的微物理性质和组成成分相同。整个试验期间观测的激光雷达比在 43~72 sr 之间, 总平均值为 57.9 sr; 初步判断, 处在污染型陆地型气溶胶激光雷达比的范围内。

关键词 大气光学; 拉曼激光雷达; 气溶胶; 激光雷达比

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2526

Optical Properties of Aerosol in Planetary Boundary Layer Measured by Raman Lidar at Hefei in Summer and Autumn

Bo Guangyu Xie Chenbo Liu Dong Chen Tao Wang Bangxin
Wang Zhenzhu Zhong Zhiqing Zhou Jun

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract A Raman-Mie lidar (RML) has been developed for measuring the extinction coefficient, backscattering coefficient and lidar ratio of atmospheric aerosols. Planetary boundary layer (PBL) aerosols were investigated with the lidar system during summer and autumn, 2009 at Hefei area. Result shows that during the experiment, remarkable variety dose no exist in the vertical profiles of lidar ratio, which means vertical distribution of aerosols in the PBL has a uniform mixture state and the same microphysical properties. Average value of lidar ratio is 64.4 ± 6.1 sr in summer, which is a little higher than that in autumn with a value of 51.5 ± 5.1 sr, this difference may caused by the change of particle component in the PBL, or the meteorologic factor. Lidar ratio does not change too much in the same season, especially in autumn. During the experiment, lidar ratio accumulated from 43 to 72 sr, with a mean value of 57.9 sr, which means particles in the PBL at Hefei area could be polluted continental aerosols.

Key words atmospheric optics; Raman lidar; aerosol; lidar ratio

1 引 言

研究大气气溶胶对地-气系统辐射收支的影响, 是精确评估和预测全球气候变化中重要的环节, 在这个环节中, 准确地获得气溶胶的消光系数远比后

向散射系数重要^[1]。探测气溶胶的米氏散射激光雷达已经得到广泛的应用, 然而米散射方法求解消光系数时, 激光雷达比(消光后向散射比)所取假设值的不确定性可能达到甚至超过 100%^[1], 因而不利

收稿日期: 2009-12-01; 收到修改稿日期: 2010-01-18

基金项目: 国家 973 计划(2006CB403702)资助课题。

作者简介: 伯广宇(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光学遥感技术方面的研究。E-mail: boguangyu@sohu.com

导师简介: 周军(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气探测方面的研究。E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn

于气溶胶消光系数的定量测量。拉曼激光雷达则提供了不依赖先验假设测量气溶胶消光系数、后向散射系数进而获得激光雷达比垂直廓线的方法。目前,星载米散射激光雷达 CALIPSO 已经开展应用型运行,可在全球的尺度上获取气溶胶后向散射系数垂直廓线,然而目前全球典型地域的激光雷达比信息仍然非常匮乏,因而不利于星载米散射激光雷达获取气溶胶消光系数廓线。开展拉曼-米激光雷达(RML)探查典型区域的激光雷达比信息,可以满足星载或组网运行的地基米散射激光雷达对典型地域高精度激光雷达比信息的需求。正因为气溶胶激光雷达比包含以上重要的信息,研究人员已经提出了理论模拟计算^[2]、太阳光度计+米散射激光雷达、浊度计^[3]、拉曼激光雷达以及高光谱分辨率激光雷达等各种获取激光雷达比的方法。其中拉曼激光雷达具有定量获取激光雷达比垂直廓线的能力,并且拉曼激光雷达相对于高光谱分辨率激光雷达具有更高的性价比,且技术风险相对较小。

利用拉曼激光雷达观测边界层气溶胶在欧洲、美国以及日本、韩国等国家和中国台湾地区已经开展^[4~7],然而,目前针对中国大陆地区气溶胶的 532 nm 激光雷达比的研究则鲜见报道^[8],仅有针对北京和珠三角地区的短期个别观测报道^[8,9],并且所使用的拉曼激光雷达均来自国外。中国幅员辽阔、气溶胶光学参数的时空分布复杂,因而对典型区域的激光雷达比进行观测研究极具价值。

中国科学院安徽光学精密机械研究所近期开展了拉曼激光雷达技术的研究,利用拉曼-米散射激光雷达实现了 532 nm 气溶胶的消光系数、后向散射系数和激光雷达比的定量测量。2009 年 7 月~11 月,使用该型激光雷达对地处我国中东部的合肥地区边界层(PBL)气溶胶的激光雷达比进行了定量观测试验。

2 拉曼-米激光雷达系统和数据处理方法

2.1 拉曼-米激光雷达系统介绍

拉曼-米激光雷达^[10]垂直向大气中发射 532 nm

的脉冲激光,通过探测氮气分子 607 nm 振动拉曼信号和 532 nm 弹性散射信号,反演气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比廓线,表 1 给出了系统的主要技术参数。

表 1 拉曼-米激光雷达主要技术参数

Table 1 Parameters of RML system

Laser	Nd:YAG
Wavelength /nm	532
Pulse energy /mJ	200
Pulse repeat frequency /Hz	20
Divergence /mrad	0.6
Receiver	Cassegrain
Diameter /mm	400
Field of view /mrad	2.5
Filter bandwidth /nm	0.3
Data acquisition	PMT
Raman data acquisition	Photo counting
Max count rate /MHz	350
Range resolution /m	30
Mie data acquisition	A/D
A/D resolution /bit	12
Range resolution /m	30

激光雷达采用二倍频 Nd:YAG 激光器作光源。为保证拉曼和米散射两个通道的几何因子相同,在设计接收光路时需保证两通道的光程相等。通常拉曼信号较米氏散射信号弱 3~4 个数量级,故拉曼信号需要采用高灵敏度光电倍增管和光子计数方式进行信号检测。为了尽量压缩激光雷达几何因子的影响高度,采取将发射光路紧贴接收望远镜、并加大望远镜接收视场角(2.5 mard)等措施尽量压缩几何因子的影响高度,但是近地面的回波信号仍需进行几何因子校订。

2.2 数据处理方法

拉曼方法求解气溶胶消光系数的公式为

$$\alpha_a(\lambda_L, z) = \frac{\frac{d}{dz} \ln \{ N_N^2(z) / [z^2 P(\lambda_R, z)] \} - \alpha_m(z, \lambda_L) [1 + (\lambda_R / \lambda_L)^{-4}]}{1 + (\lambda_R / \lambda_L)^{-\nu}}, \quad (1)$$

式中 $N_N^2(z)$ 是高度为 z 处的氮气分子数密度,可以利用标准大气模式获得。 $\alpha_m(z)$ 和 $\alpha_a(z)$ 分别是高度 z 处

的分子和气溶胶消光系数。 λ_L, λ_R 分别为激发波长和拉曼散射波长。气溶胶消光波长指数 ν 取 1^[1],当 ν 取 1

时, ν 初值在 0~2 之间的不确定性引入的消光系数反演误差小于 5%。求解消光系数时, 对(1)式中求导项的处理非常关键, 针对该项的处理已经提出了多种

算法^[11,12], 这里采用较成熟的滑动最小二乘拟合法。最小二乘法要求观测值的母体服从正态分布的^[11], 因此首先将(1)式中求导项展开为

$$\frac{d}{dz} \ln \{ N_N^2(z) / [z^2 P(\lambda_R, z)] \} = \frac{1}{N_N^2(z)} \frac{dN_N^2(z)}{dz} - \frac{1}{z^2 P(\lambda_R, z)} \times \frac{d}{dz} [z^2 P(\lambda_R, z)], \quad (2)$$

然后分别对氮气分子数密度和拉曼距离平方校正信号作拟合^[11]。

气溶胶后向散射系数可以通过米氏散射信号与拉曼信号之比获得。由于两个通道的几何因子相同, 该方法反演后向散射系数不受几何因子的影响, 因而可以获取激光雷达盲区以上高度的后向散射系数, 该方法求解后向散射系数的公式为

$$\beta_a(\lambda_L, z) = \left[\frac{P(\lambda_L, z)}{P(\lambda_R, z)} R_C \frac{P(\lambda_R, z_c)}{P(\lambda_L, z_c)} \Delta T - 1 \right] \beta_m(\lambda_L, z), \quad (3)$$

式中

$$\Delta T = \frac{\exp \left\{ - \int_z^{z_c} [\alpha_a(z', \lambda_L) + \alpha_m(z', \lambda_L)] dz' \right\}}{\exp \left\{ - \int_z^{z_c} [\alpha_a(z', \lambda_R) + \alpha_m(z', \lambda_R)] dz' \right\}}$$

为两个波长的分子和气溶胶透射率的比值, $P(\lambda_L, z)$, $P(\lambda_R, z)$ 分别为米氏散射和拉曼信号。引入参考高度 z_c 上的气溶胶散射比 R_C , 用来标定拉曼和米氏散射两个通道的系统常数。

最后由(1), (3)式联立, 可得激光雷达比 $S(z)$ 的求解公式为

$$S(z) = \alpha_a(\lambda_L, z) / \beta_a(\lambda_L, z). \quad (4)$$

2.3 试验方法

2009年7~11月试验期间, 使用RML对合肥地区(31.9N, 117.17E)边界层气溶胶进行了常规观测, 合肥地处江淮之间, 7月, 8月处在高温湿热的夏季, 9~11月处在干燥少雨的秋季, 气温和水气压的月间变化明显, 该地区对分析陆地型气溶胶的光学性质具有代表性意义。

试验期间, 保持系统光路和数据采集单元相关参数不作调整。选择晴朗的夜晚, 在日落后1~3h内进行6组观测, 每组信号累积10000发激光脉冲, 信号采样的空间分辨率为30m。为提高拉曼信噪比, 需将6组信号累加在一起进行反演, 因而获得的气溶胶光学参数是每晚2h内的平均过程。使用U. Wandinger等^[13]提出的几何因子校正方法对0.9km以下高度的回波信号进行校正。由于长时

间放置, RML光路自身的变化可能会导致几何因子的变化, 因而需对几何因子作定期校订。8月17日之前使用7月16日测得的几何因子, 之后(含8月17日)使用9月6日测得的几何因子, 如图1所示。相隔近两个月测量的两组几何因子在0.4~0.9km高度范围内几乎一致, 说明系统光路自身变化很小, 也说明几何因子的测量方法是可靠的。0.4~0.9km高度范围内由于几何因子校订误差引入的反演误差在20%~10%之间^[8]。

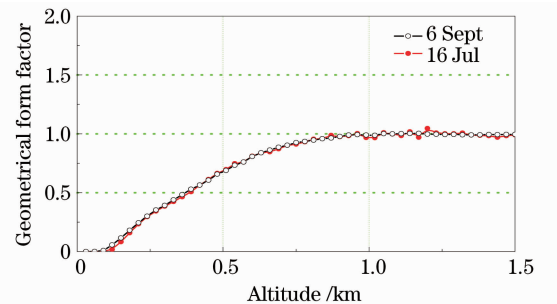


图1 RML测量的激光雷达几何因子

Fig. 1 Geometric form factor of the RML system

由于受多次散射、激光发散角波动等因素的影响, 图1中0~0.4km高度范围内几何因子校订误差较大, 因此分析测量结果时, 未给出0.4km以下的反演结果。

3 测量结果

3.1 数据质量检验

拉曼方法反演消光系数时, 无需对激光雷达比进行事先假设, 也无需标定及假设标定值, 因而具有很高的精度^[14]。拉曼-米方法反演后向散射系数时, 则需要进行标定。拉曼和米氏散射信号的信噪比决定了标定高度的选择和标定假设值的取值, RML标定高度 z_c 通常选在6~9km高度上, 该高度上的气溶胶散射比 R_C 取1.05, 此时 R_C 初值在1.01~1.10之间不确定性带来的后向散射系数反演误差在5%内。为了验证RML后向散射系数标定方法的准确性, 在观测试验之初, 首先进行了对比验证, 将RML与中国科学院安徽光学精密机械研

究所另一台技术成熟、用于常规观测的双波长米散射激光雷达(532~1064 nm, DWL)在同时间、同地点开展探测,两台激光雷达信号累积均为 10000 发激光脉冲。DWL 使用 Fernald 方法,激光雷达比假设值取 50 sr,标定点选在对流层顶附近,标定点处气溶胶散射比取 1.01。RML 使用拉曼-米方法反演后向散射系数。图 2 给出了两种方法求解后向散射系数的对比和相对误差。

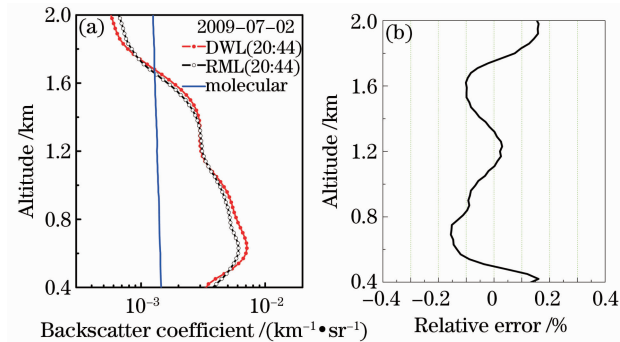


图 2 两种方法、两台激光雷达之间的后向散射系数对比(a)和相对误差(b)

Fig. 2 Inter-comparison (a) and relative error (b) of aerosols backscatter measured by two lidar

由图 2 可知,两条后向散射系数廓线的变化趋势吻合很好,在 0.4~2.0 km 高度范围内,RML 与 DWL 两台激光雷达之间的平均偏差为 $(8 \pm 5)\%$ 。1km 以下高度 DWL 的测量结果较 RML 稍偏大,原因之一可能是 DWL 在这个高度上存在几何因子校正误差,而 RML 使用拉曼-米方法计算后向散射系数时,不受几何因子的影响,因而 RML 更加精确;原因之二是 DWL 所取的激光雷达比假设值(50 sr)较激光雷达比实际测量值(64 sr)偏小,导致 DWL 后向散射系数的反演结果较真实值偏大。以上对比结果说明,RML 反演后向散射系数的定标方法是合理的,并且 RML 具有无需事先假设激光雷达比以及不受几何因子的影响等优势。

3.2 结果与分析

利用 RML 探测到的米散射距离平方校正后的信号,可以确定大气边界层的高度,图 3 给出了试验期间夜间相同的时间段边界层高度的变化,夜间边界层高度介于 0.9~3 km 之间。以 8 月 25 日为分界,之前的边界层的高度一般在 1.5 km 高度以上,之后的边界层的高度一般在 1.5 km 高度以下(10 月 6 日除外)。太阳辐射和气象条件是影响大气边界层高度变化的主要因素。

整个试验期间,8 月份多阴雨,观测次数较少。

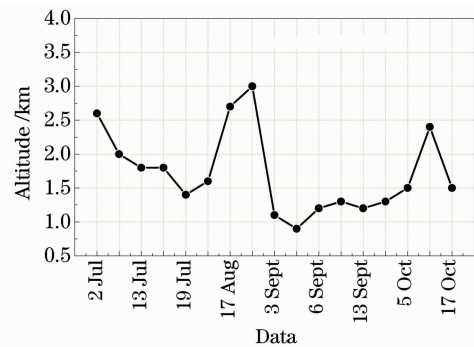


图 3 合肥大气边界层高度的变化

Fig. 3 Altitude of the PBL at Hefei

在剔除个别大气状况非常清洁时的观测后,总共有 16 天有效数据。图 4 给出了 7 月 2 日至 10 月 6 日 532 nm 波长的气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比垂直廓线的典型结果。图 4(a)~(l) 各组结果显示,0.4 km 高度处的气溶胶消光系数在 $0.23 \sim 0.70 \text{ km}^{-1}$ 之间,平均值为 0.40 km^{-1} 。图 4 给出的消光系数最小的可探测值约为 0.1 km^{-1} 。利用对(2)式中拉曼距离平方校正信号进行最小二乘拟合的误差,可以计算消光系数的反演误差。由于拉曼信号的信噪比随高度上升而下降,使得对拉曼距离平方校正信号拟合的误差随高度上升而增大,当拟合误差超过 50% 时,即为图 4 给出的各组消光系数最大有效探测高度。

在 0.4~1.2 km 高度范围内,图 4 所示的各组激光雷达比廓线的趋势随高度上升变化不大,该高度范围内各组激光雷达比的平均值的标准偏差在 5 sr 之内,激光雷达比没有明显的突变,说明夜间近地面气溶胶混合得较均匀、微物理性质较一致。图 4 所示的各组激光雷达比廓线一般在 1.2 km 以上高度出现轻微的振荡,这是由于气溶胶的消光作用随其含量的减小而减弱以及拉曼信噪比下降引起的。

表 2 给出了相应的探测高度上观测的气溶胶光学厚度和激光雷达比平均值的统计结果,整个试验期间激光雷达比平均值分布在 43~72 sr 之间。按合肥地区季节变化,将数据分为夏秋两季进行统计,夏季包括 7 月和 8 月,秋季包括 9 月和 10 月,夏秋各有 8 组数据。夏季激光雷达比平均值为 64.4 sr,秋季激光雷达比的平均值为 51.5 sr,夏季气溶胶激光雷达比略高于秋季。在同一季节内,尤其秋季,各天观测的气溶胶激光雷达比变化很小,显示在相同的季节内边界层内气溶胶的来源和组成成分相同。

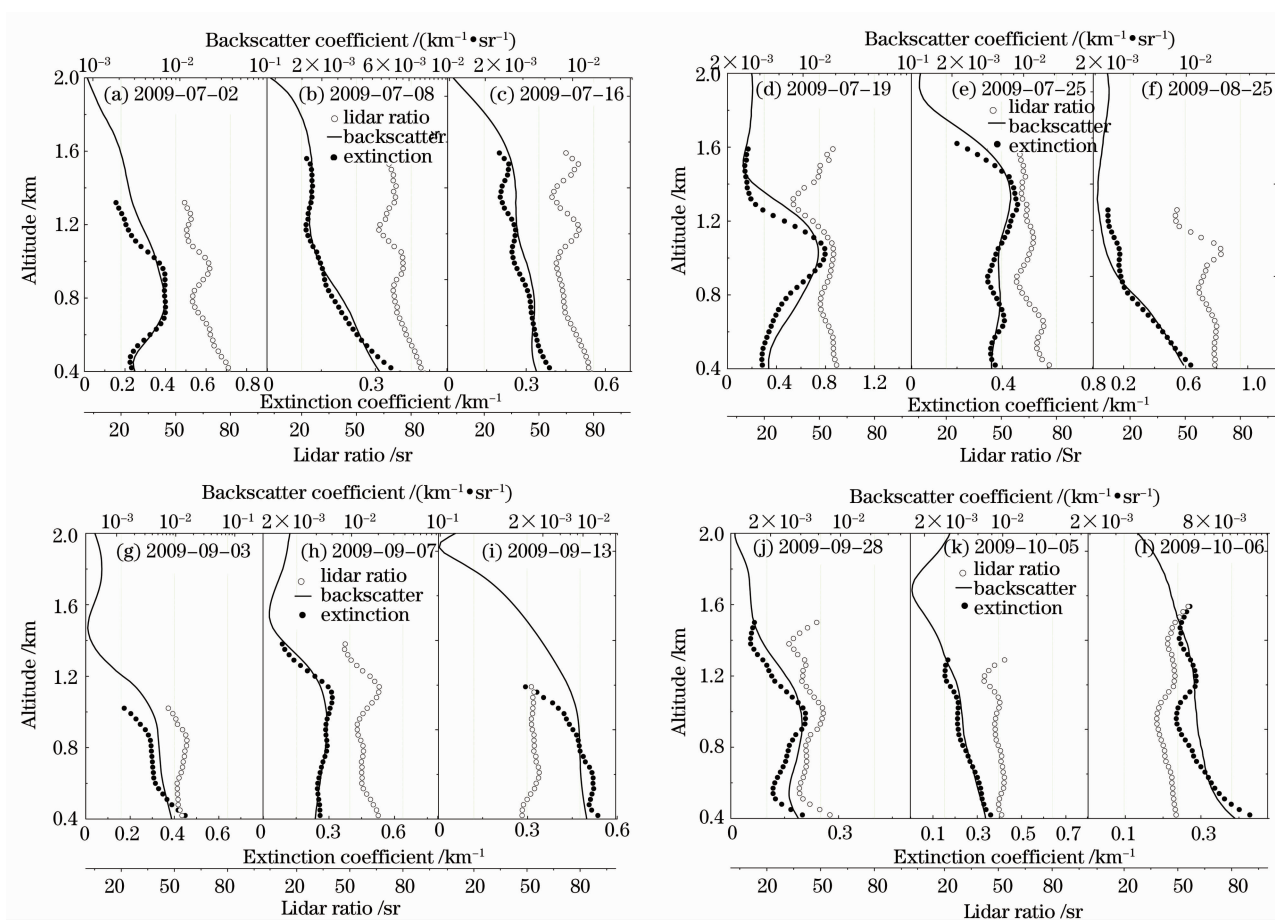


图 4 消光系数、后向散射系数和激光雷达比廓线的测量结果

Fig. 4 Extinction coefficient , backscattering coefficient and lidar ratio of aerosols

表 2 激光雷达比观测结果统计

Table 2 Statistic of lidar ratio

Date	Altitude /km	PBL /km	AOD	Lidar ratio /sr
Jul. 2	0.42~1.32	2.6	0.28	64.2±6.7
Jun. 8	0.42~1.56	2.0	0.20	72.4±5.7
Jul. 13	0.42~1.56	1.8	0.21	69.0±8.9
Jul. 16	0.42~1.59	1.8	0.32	66.3±5.4
Jul. 19	0.42~1.59	1.4	0.48	51.8±6.5
Jul. 25	0.42~1.62	1.6	0.46	64.8±4.8
Aug. 17	0.42~1.38	2.7	0.19	65.6±13.4
Aug. 25	0.42~1.26	3.0	0.24	60.9±7.4
Average(summer)		2.1	0.30	64.4±6.1
Sept. 3	0.42~1.02	1.1	0.18	53.2±2.6
Sept. 5	0.42~0.96	0.9	0.23	55.1±3.9
Sept. 6	0.42~1.14	1.2	0.26	54.7±2.8
Sept. 7	0.42~1.38	1.3	0.25	58.0±5.2
Sept. 13	0.42~1.14	1.2	0.33	53.1±2.6
Sept. 28	0.42~1.50	1.3	0.15	42.9±5.1
Oct. 5	0.42~1.29	1.5	0.21	49.7±3.0
Oct. 6	0.42~1.59	2.4	0.33	45.4±4.0
Average(autumn)		1.4	0.24	51.5±5.1

图 5 给出了整个试验期间激光雷达比的变化趋势,从图 5 中可以看到,夏季测量的激光雷达比要略高于秋季。Boyan Tatarov 等^[15]在日本使用高光谱分辨激光雷达的观测结果也有类似的现象,激光雷达比存在随季节变化趋势,并且夏季的激光雷达比

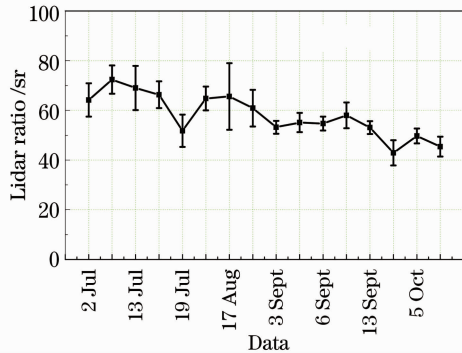


图 5 激光雷达比平均值的统计结果

Fig. 5 Statistic of average lidar ratio

要高于秋冬季。

试验期间,合肥附近的安庆(30.53N,117.05E)和阜阳(32.86N,115.73E)无线电探空站的数据显示,夏季的水气混合比应该高于秋季。NOAA HYSPLIT MODEL 四天的后向追踪显示,7~8 月份,合肥地区 0.5~1.5 km 高度范围内以西南方向气流为主,而 9~10 月份则以东南或东北方向气流为主。气溶胶的来源地域、混合成分、水合作用均有可能是导致激光雷达比变化的原因^[4]。

激光雷达比与散射粒子的微物理性质有关,一定程度上可以用来辨别气溶胶的类型,通常认为粗粒子对应较小的激光雷达比^[16]。表 3 给出了近期 532 nm 波长气溶胶激光雷达比的相关研究报道,其中包括人类活动产生的燃烧烟灰、城市和工业生产排放的污染物气溶胶,以及自然产生的海盐、沙尘和清洁陆地型等主要类型的气溶胶^[4,9,14~17]。

表 3 532 nm 波长气溶胶激光雷达比的相关研究报道

Table 3 Published lidar ratio values at 532nm

Article	Lidar ratio /sr					
	Biomass burning	Urban/ industrial	Maritime	Dust	Clean continental	Non-categorized aerosol
Kent <i>et al.</i> , 1998	50~90					
Anderson <i>et al.</i> , 2000		55~75	20~30		25~55	
Powell <i>et al.</i> , 2000				30~40		
Müller <i>et al.</i> , 2001	45~75	45~60	20~30	20~25		
Müller <i>et al.</i> , 1998		55~95				
Ansmann <i>et al.</i> , 2000	50~90					
Doherty <i>et al.</i> , 1999			20		60~70	
Tatarov <i>et al.</i> , 2005 Japan						40~65
Tesche <i>et al.</i> , 2007						30~45 (Beijing)
Beijing, Xinken						40~55 (Xinken)
Noh <i>et al.</i> , 2007						40~75
Korea						(59 average)
Chenbo Xie <i>et al.</i> , 2008, Beijing				40±10		40~60

表 3 给出的报道以及根据散射模型模拟计算的结果^[2]均显示,自然产生的海盐类气溶胶粒子的激光雷达比一般在 20~30 sr 之间;沙尘气溶胶的激光雷达比一般在 20~40 sr 之间;人类活动产生的城市颗粒物、工业污染以及矿石燃料生成的烟灰气溶胶的激光雷达比一般在 40~90 sr 之间。本次试验测量的激光雷达比在 43~72 sr 之间,总平均值为 57.9 sr,同表 3 中一些已有的激光雷达比研究报道有很多相似性,尤其与 Noh 等在韩国的观测有很好的类似性。

4 结 论

试验给出的 532 nm 波长的激光雷达比分布在

43~72 sr 之间,总平均值为 57.9 sr,结合合肥的周边工业和城市活动的具体情况,合肥地区边界层气溶胶应该属于包含工业和城市污染物粒子的污染型陆地气溶胶,该结论同污染型陆地气溶胶激光雷达比的一些模拟计算也有很好的一致性^[18]。夏秋季边界层气溶胶的观测结果表明,气溶胶激光雷达比夏季相对较高,秋季相对较小,虽然总体变化不明显,但也说明边界层内气溶胶的组成成分或微物理性质有一定程度的变化。然而,导致气溶胶激光雷达比变化的原因是极其复杂的,为了清晰地分析气溶胶激光雷达比变化的原因,需要结合当地气象资料、天空辐射计、微波雷达以及飞机或探空气球直接取样等多种手段联合探测做进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Peter von der Gathen. Aerosol extinction and backscatter profiles by means of a multiwavelength Raman lidar: a new method without a priori assumptions[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(3): 463~466
- 2 J. Ackermann. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosols: a numerical study [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1998, **15**: 1043~1050
- 3 Sarah J. Doherty, Theodore L. Anderson, Robert J. Charlson. Measurement of the lidar ratio for atmospheric aerosols with a 180° backscatter nephelometer[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9): 1823~1832
- 4 Young M. Noh, Young J. Kim, Detlef Müller. Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**: 2208~2224
- 5 Wei-Nai Chen, Fu-Jung Tsai, Charles C.-K. Chou *et al.*. Optical properties of Asian dusts in the free atmosphere measured by Raman lidar at Taipei, Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**: 7698~7714
- 6 Tetsu Sakai, Takashi Shibata, Yasunobu Iwasaka *et al.*. Case study of Raman lidar measurements of Asian dust events, in 2000 and 2001 at Nagoya and Tsukuba, Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 5479~5489
- 7 G. Pappalardo, A. Amodeo, M. Pandolfi *et al.*. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project 3. Raman lidar algorithm, for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(28): 5370~5385
- 8 M. Tesche, A. Ansmann, D. Müller *et al.*. Particle backscatter, extinction, and lidar ratio profiling with Raman lidar in south and north China [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(25): 6302~6308
- 9 Chenbo Xie, Tomoki Nishizawa, Nobuo Sugimoto *et al.*. Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4945~4951
- 10 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Raman-Mie lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025
伯广宇, 钟志庆, 刘 博 等. 瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 11 D. N. Whiteman. Application of statistical methods to the determination of slope in lidar data [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3360~3369
- 12 Pornsarp Pornsawad, Christine Böckmann, Christoph Ritter *et al.*. Ill-posed retrieval of aerosol extinction coefficient profiles from Raman lidar data by regularization [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1649~1661
- 13 U. Wandinger, A. Ansmann. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3): 511~514
- 14 Fei Gao, Xiaoquan Song, Yufeng Wang *et al.*. Ultraviolet Raman lidar for high-accuracy profiling of aerosol extinction coefficient [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 95~97
- 15 Boyan Tatarov, Nobuo Sugimoto, Ichiro Matsui *et al.*. Observations of the seasonal variations of the tropospheric aerosols optical properties by high-spectral-resolution lidar over Tsukuba, Japan [C]. *SPIE*, 2005, **5653**: 290~297
- 16 Francesca Barnaba, Ferdinando De Tomasi, Gian Paolo Gobbi *et al.*. Extinction versus backscatter relationships for lidar applications at 351 nm: maritime and desert aerosol simulations and comparison with observations [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **70**: 229~259
- 17 Christopher Catrall, John A. Reagan, Kurtis J. Thome. Lidar aerosol ratios at 1 and 10 microns [J]. *SPIE*, 2003, **5086**: 112~120
- 18 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