

探测气溶胶消光特性的双波长米散射激光雷达

迟如利^{1,2}, 吴德成¹, 刘 博¹, 钟志庆¹, 周 军¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031;

2 解放军汽车管理学院, 安徽 蚌埠 233000)

摘 要: 研制了一台双波长米散射激光雷达, 用来探测对流层大气气溶胶 532 nm 和 1064 nm 两个波段的消光特性及其时空分布。该雷达系统采用四个通道分别用于对流层下部和中上部 532 nm 及 1064 nm 的大气回波信号, 并采用窄带滤光片, 借助小孔光阑, 有效压制背景, 以提高系统白天探测能力。描述了该雷达系统的总体结构和技术参数以及数据处理方法。给出了合肥地区 (N31°54', E117°10') 对流层大气气溶胶 532 nm 及 1064 nm 大气气溶胶消光系数的垂直廓线及其时空分布的典型探测结果, 分析了气溶胶的波长依赖指数和 532nm 波段的光学厚度。观测和分析结果表明, 双波长具备昼夜连续观测对流层大气气溶胶的能力, 可以很好地反映气溶胶粒子的时间和空间分布特征。

关键词: 激光雷达; 大气气溶胶; 消光系数; 光学厚度; 双波长

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2008)03-0179-08

Dual-wavelength Mie Lidar for Measuring the Whole Tropospheric Aerosols

CHI Ru-li^{1,2}, WU De-cheng¹, LIU Bo¹, ZHONG Zhi-qing¹, ZHOU Jun¹

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

2 Automobile Management College of Peoples's Liberation Army, Bengbu 233000, China)

Abstract: A new dual-wavelength Mie lidar (DWL) was developed for measuring the optical properties and their spatial and temporal variations of tropospheric aerosol at 532 nm and 1064 nm wavelength. Four channels are adopted to receive the far and near range backscattering signals at 532 nm and 1064 nm wavelength respectively. In order to enhance the capability of daytime measurement, the system employs a narrow band interference filter to separate the main backscattering signal of lidar return, including Mie backscattering signal and Rayleigh backscattering signal from all the backscattering signals including non-elastic scattering

收稿日期: 2008-03-05

基金项目: 国家 973 计划项目资助课题.(2006CB403702)

E-mail: rlchi@126.com

signal and solar spectrum, by using an iris to block the majority of sky background. Overall structure and specifications of the lidar are described. Lidar data processing method is also presented. The lidar system was operated at Hefei(N31°54', E117°10'). The profile of extinction coefficient of tropospheric aerosol and its temporal-spatial distribution were obtained. Optical depth and Angstrom exponent of aerosol are also discussed. The observed results show that this lidar works well day and night, and it has ability to measure the tropospheric aerosols and to manifest the temporal and spatial distributions of the aerosols with high precision.

Key words: lidar; atmospheric aerosol; extinction coefficient; optical thickness; dual-wavelength

1 引言

对流层气溶胶粒子通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射而影响着地球-大气系统的辐射收支,同时它作为凝结核参与云的形成,从而对局地、区域乃至全球的气候有着重要的影响。人类活动产生的气溶胶是全球气候预测的研究中最不确定的因子之一^[1],它对传输于其中的光会产生吸收和散射作用,这使它成为光在大气传输中的一个重要消光因子。因此,进行对流层气溶胶光学特性的测量一直是气候、环境和大气科学等领域研究中十分关心的问题,已为各国所重视。

激光雷达为对流层气溶胶探测提供了有力的工具,它可以有效测量气溶胶光学特性及其时空分布,在探测高度、时空分辨率以及测量精度上,是其它手段难以比拟的^[2-5]。近年来,双波长米散射激光雷达的大气气溶胶探测技术受到激光雷达界的关注和青睐,因为它不仅可以获得不同波长的气溶胶消光系数,还可以在一定程度上反映出气溶胶粒子尺度谱随高度分布的特征。对流层大气气溶胶粒子具有垂直结构复杂、尺度谱范围宽、日变化大、对流层顶高度在 10~15 km 等主要特点^[6],因此,要求用于探测的激光雷达除必须满足空间分辨率高、接收信号的动态范围大、测量时间短等特点之外,还要尽可能地对整个对流层进行瞬时探测,以获得整个对流层气溶胶的有效信息。

中国科学院安徽光机所建立了一套双波长米

散射激光雷达系统,该系统采用四通道分别同时用于对流层下部(低层)和中上部(高层)气溶胶 532 nm 及 1064 nm 波长消光特性的探测。通过分层同时探测,可以有效地获得整个对流层大气气溶胶的实际分布。文中介绍了该激光雷达的总体结构和技术参数,叙述了数据处理方法,给出了合肥地区对流层大气气溶胶 532 nm 及 1064 nm 波长消光系数垂直廓线、光学厚度和 Angstrom 指数的探测结果,并对结果进行了分析和讨论。

2 双波长米散射激光雷达系统

图 1 是自行研制的双波长米散射激光雷达的结构示意图,从图中可以看出,双波长米散射激光雷达主要由激光发射单元、接收光学单元、信号探测和采集以及控制单元四部分组成。系统采用 Nd:YAG 脉冲激光器作为光源,采用基波 1064nm 和两次谐波 532nm 为探测波长。激光束经准直扩束后垂直射入大气,每一发激光脉冲均被传输路径上的空气分子和大气气溶胶所散射,大气的后向散射光被接收望远镜接收,并耦合入多模光纤,光纤输出信号经准直后入射到一块分色镜上,再由相应通道的光电倍增管所接收。光电倍增管将探测的光信号转换为电信号,再由多通道放大器放大,高速采集卡采集。最后由主控计算机进行存储和显示。运行控制软件还可以根据实际测量要求设置定时测量的参数,实现全自动无人值守探测,得到一定时间间隔或连续的测量结果。

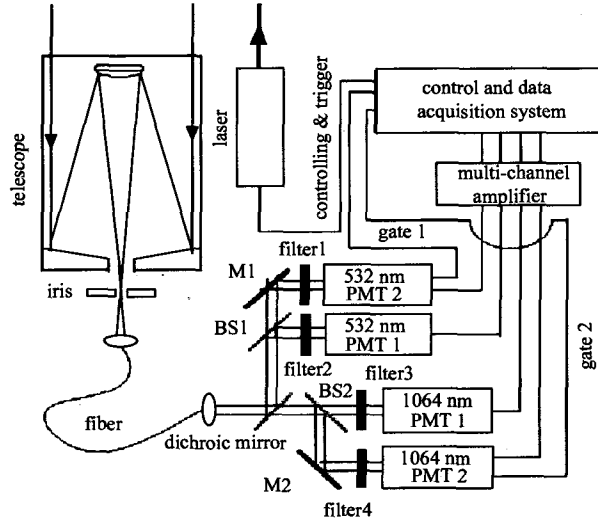


图 1 双波长米散射激光雷达的结构框图

Fig.1 Schematic diagram of the DWL system

表 1 双波长激光雷达系统的主要技术参数

Table 1 Specification of the DWL system

Parameter	Value
Transmitter	
Laser	continuum Nd:YAG
Wavelength(nm)	532/1064
Pulse energy (mJ)	180/120
Divergence (mrad)	0.5
Pulse repetition rate (Hz)	20
Receiver	
Telescope type	Cassegrain
Telescope aperture (mm)	400
Field of view (mrad)	4
Central wavelength of filter (nm)	532/1064
Filter bandwidth (nm)	0.25
Vertical spatial resolution (m)	30

为了提高系统在白天的探测能力, 在望远镜后采用可调的小孔光阑来获得适当的接收视场, 并在探测器前采用窄带滤光片来有效的抑制天空

背景和噪声。为了获得整个对流层气溶胶的有效信息, 系统采用四个探测通道分别同时用于高低层 532 nm 和 1064 nm 的大气回波信号的探测, 其

中高层探测器利用门控电路(可调节)在 2 km 以外开始采集大气回波信号。各自波段内的高低层大气回波信号经过有效拼接后,可以反演出整个对流层的大气气溶胶消光系数和其它光学特性参数。表 1 列出了双波长米散射激光雷达的主要技术参数。

3 数据处理方法

测量于晴朗的天气(白天和夜晚)下进行,激光雷达呈垂直指向,向大气发射 10000 发激光脉冲,两个波段的高低层探测通道同时进行测量。激光脉冲通过大气时,其接收高度 Z 处大气弹性后向散射一次散射信号的能量 $P(Z)$ 由激光雷达方程决定^[7]

$$P(\lambda, Z) = P_0 k Z^{-2} \beta(\lambda, Z) \exp \left[-2 \int_0^Z \alpha(\lambda, Z') dZ' \right]. \quad (1)$$

其中, P_0 是激光发射能量, k 为激光雷达系统常数, $\beta(\lambda, Z) = \beta_a(\lambda, Z) + \beta_m(\lambda, Z)$, $\beta_a(\lambda, Z)$ 和 $\beta_m(\lambda, Z)$ 分别是高度 Z 处的大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数 ($\text{km}^{-1}\text{Sr}^{-1}$), $\alpha(\lambda, Z) = \alpha_a(\lambda, Z) + \alpha_m(\lambda, Z)$, $\alpha_m(\lambda, Z)$ 和 $\alpha_a(\lambda, Z)$ 分别是高度 Z 处的大气分子和气溶胶粒子的消光系数 (km^{-1})。

如果事先已知某一高度 Z_c 处气溶胶粒子和空气分子消光系数,则 Z_c 处以下各高度上的气溶胶粒子消光系数(后向积分)为

$$\alpha_a(\lambda, Z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(\lambda, Z) + \frac{X(\lambda, Z) \exp \left[2 \left(\frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)} - 1 \right) \int_Z^{Z_c} \alpha_m(\lambda, Z) dZ \right]}{\frac{X(\lambda, Z_c)}{\alpha_a(\lambda, Z_c) + \frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)} \alpha_m(\lambda, Z_c)} + 2 \int_Z^{Z_c} X(\lambda, Z) \exp \left\{ 2 \left[\frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)} - 1 \right] \int_Z^{Z_c} \alpha_m(\lambda, Z) dZ \right\} dZ}, \quad (2)$$

而 Z_c 以上各高度处的气溶胶粒子消光系数(前向积分)为

$$\alpha_a(\lambda, Z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(\lambda, Z) + \frac{X(\lambda, Z) \exp \left[2 \left(\frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)} - 1 \right) \int_{Z_c}^Z \alpha_m(\lambda, Z) dZ \right]}{\frac{X(\lambda, Z_c)}{\alpha_a(\lambda, Z_c) + \frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)} \alpha_m(\lambda, Z_c)} - 2 \int_{Z_c}^Z X(\lambda, Z) \exp \left\{ -2 \left[\frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)} - 1 \right] \int_{Z_c}^Z \alpha_m(\lambda, Z) dZ \right\} dZ}, \quad (3)$$

上述两式中, $X(\lambda, Z) = P(\lambda, Z)/Z^2$ 。空气分子的后向散射系数 $\beta_m(\lambda, Z)$ 可以通过实际大气中温压湿气象探空资料或使用温压湿标准大气模式,获得空气分子的密度,再由分子 Rayleigh 散射理论计算得到。本文在计算时, 1064 nm

和 532 nm 波长的 $\beta_m(\lambda, Z)$ 都是使用 300N 冬/夏季美国温压湿标准大气模式,并由分子 Rayleigh 散射理论计算得到。对分子而言有 $S_2 = \alpha_m(\lambda, Z)/\beta_m(\lambda, Z) = 8\pi/3(\text{Sr})$ ^[8], 通过大气分子的后向散射系数 $\beta_m(\lambda, Z)$ 和 S_2 可以求得大气分子的

消光系数 $\alpha_m(\lambda, Z)$ 。 $S_1 = \alpha_a(\lambda, Z)/\beta_a(\lambda, Z)$ 是气溶胶消光后向散射比, 它依赖于发射的激光波长和折射指数等, 数值一般在 20~70 Sr 之间^[9-10]。这里假定对于同一波长来说, 气溶胶消光后向散射比为常数, 这意味着气溶胶的消光和散射特性的变化仅仅是由于其数密度随高度的改变而引起的。对于 1064 nm 波长, 取 $S_2 = 40$ Sr; 对于 532 nm 波长, 取 $S_2 = 50$ Sr^[9-10]。标定高度 Z_C 是通过选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定, 这个高度一般在对流层顶附近, 其边界值 532 nm 波长的气溶胶消光系数由气溶胶散射比 $R(\lambda, Z_C) = 1 + \beta_a(\lambda, Z_C)/\beta_m(\lambda, Z_C) = 1.01$ 来确定。对 1064 nm 波长, 气溶胶散射比 $R(\lambda, Z_C) = 1.08$ 。求出气溶胶消光系数的垂直廓线后, 进而可以通过积分求得气溶胶的光学厚度以及由气溶胶的消光系数与波长的依赖关系得到反映气溶胶尺度分布特征的 Angstrom 指数。

4 观测结果及分析

双波长米散射激光雷达研制完成后, 对其接

收大气后向散射信号的正确性进行了检验, 将其探测得到的双波长大气后向散射回波信号 (实线, 低层信号经过几何因子校正) 分别与对应波长的数值模拟计算信号 (虚线, 双波长米激光雷达接收大气回波信号的理论曲线) 进行了比较, 如图 2 所示。从图中可以看出在整个探测高度范围内实际探测信号和模拟信号符合较好, 只是在 3~4 km 范围内, 由于实际大气出现了一层气溶胶层, 与计算模拟信号的大气气溶胶模式有些差别, 造成了二者并不完全重合, 但两条曲线的趋势基本一致。二者的一致性表明双波长米散射激光雷达接收信号正确可信。图 3 给出了 2008 年 2 月 26 日晚与在同一地域的另一台偏振米散射激光雷达进行了 532 nm 波段大气气溶胶消光系数的对比测量结果。从图中可以看出, 整体上两者的探测结果吻合得较好, 特别是对于同一高度区域上一些大气气溶胶层结的细微结构的探测也表现得较为一致。当天气溶胶粒子主要集中在 2 km 以下, 在 4~5 km 的高度上也出现了一层气溶胶层, 该层气溶胶消光系数的峰值达到了 0.1 km^{-1} 。对比

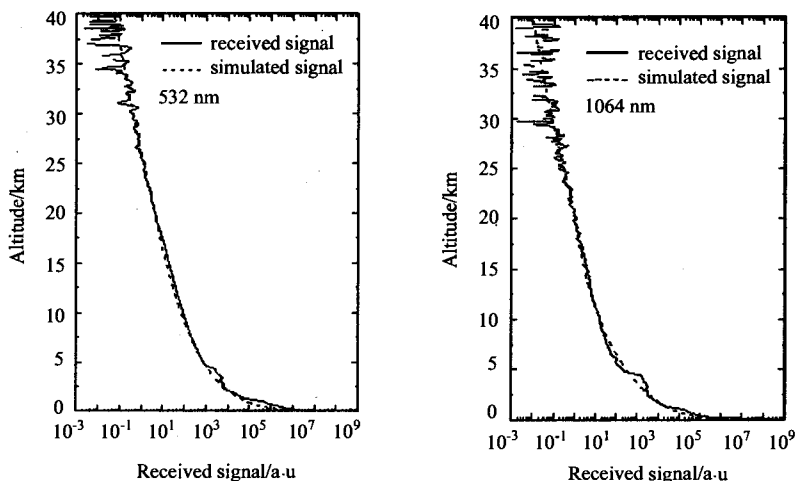


图 2 实际大气后向散射双波长回波信号与数值模拟计算信号比较

Fig.2 Comparison between actual received signal and the simulation values for dual-wavelength

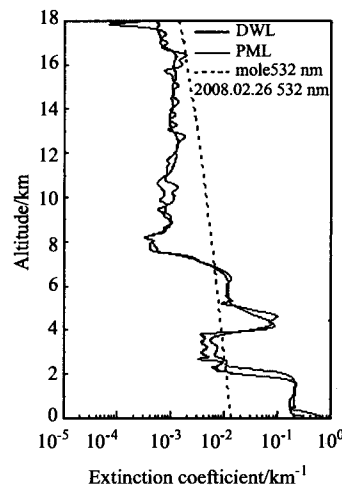


图 3 DWL 与 PML 探测气溶胶消光系数的对比测量

Fig.3 Extinction coefficient of aerosol measured by PML and DWL

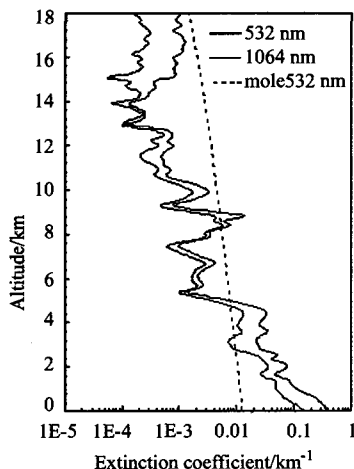


图 4 双波长激光雷达探测的大气气溶胶消光廓线

Fig.4 Vertical profiles of Ext. Coe. of aerosol taken by DWL

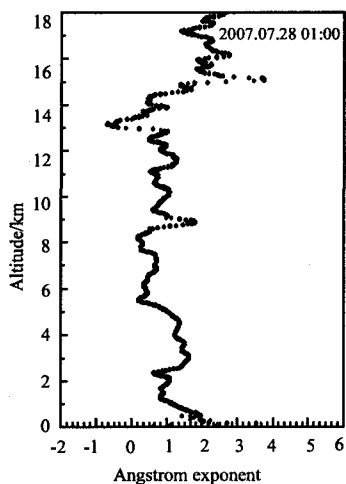


图 5 Angstrom 指数

Fig.5 Angstrom exponent of aerosol

结果显示了双波长米散射激光雷达对大气气溶胶消光系数垂直分布测量的可靠性。

图 4 和图 5 分别给出了 2007 年 7 月 28 日双波长米散射激光雷达测量得到的 532 nm 和 1064 nm 两个波长气溶胶消光系数的垂直廓线以及 Angstrom 指数的垂直廓线。从图中可以看出，两个波长的消光廓线有着较为一致的变化趋势，甚至于细微的结构也基本相似。532 nm 气溶胶消光系数较 1064 nm 的大，在不同的高度上两者之间的差值并不一样，这主要与气溶胶粒子尺度谱

的垂直分布有关。Angstrom 指数在地面至 12 km 的高度范围内在 0.5~1.5 左右波动，13 km 以上逐渐增加。由于 Angstrom 指数通常在 0~2 之间，对于粒径较激光波长大的气溶胶粒子，Angstrom 指数小于 1.0^[11]，Angstrom 越小，所反映的粒子尺度就越大，反之，就越小。因此，图 5 表明在 12 km 的范围内，随着高度的增加，小尺度气溶胶粒子在总浓度中所占的权重变化较小，而在 13~18 km 的高度内，随着高度的增加，小粒子在总浓度中所占的比重越来越大。

图 6 是 2007 年 1 月 28 日 00:00~22:00 连续 22 小时内，双波长米散射激光雷达探测得到的 532 nm 波长大气气溶胶消光系数廓线的时间演变特征。探测的时间间隔为 30 min。图中清晰地显示当天对流层内气溶胶的分布特点及大气边界层高度的变化。当天大气边界层高度在整个探测时间内，由 1.5~1.2 km 逐渐降低，但变化不大，且在边界层内富集着大量的气溶胶粒子。在 0:00~14:00 之间近地面的气溶胶消光系数较大，0~0.3 km 的气溶胶消光系数的均值达到了 0.5 km⁻¹。在 0:00~02:30 之间，4~6 km 的高度上出现了一层气溶胶粒子，在 2:30~11:00 之间，在 2~4 km 的高度上也出现了一层气溶胶，气溶胶层顶高度逐渐降低，到 11:00 左右，此层气溶胶消失。以当日 17:00 为例，从近地面至 1.2 km 范围内，气溶胶消光系数值约在 0.4~0.2 km⁻¹ 之间变化，而在 1.2~1.5 km，气溶胶的消光系数又迅速递减到 0.06 km⁻¹，表明当日气溶胶粒子主要集中在边界层内，而对流层的中上部较为干净，气溶胶含量较少。

图 7 是 2007 年 1 月 8 日在 10:00~15:00 之间，双波长米散射激光雷达 532 nm 波段与太阳辐射计 550 nm 波段探测大气光学厚度的对比结果，可以看出，当天的光学厚度较大，平均值达到了 0.5 左右，并且在四个小时内，光学厚度的变化不大。二者探测的结果符合的较好，也进一步表明了双波长激光雷达探测大气气溶胶的可靠性。

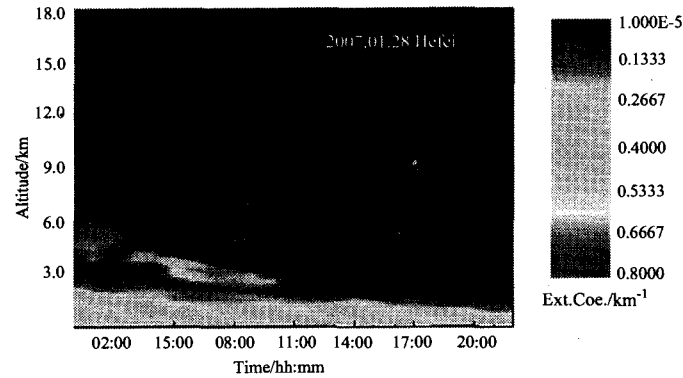


图 6 大气气溶胶消光系数的时空分布

Fig.6 Temporal and spatial variation of aerosol extinction coefficient for 532 nm wavelength

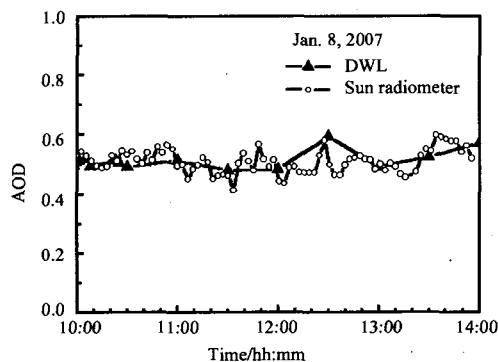


图 7 DWL 与太阳辐射计探测大气光学厚度的对比结果

Fig.7 AOD contrast between the DWL and sun radiometer

5 结 论

介绍了自行研制的一台双波长米散射激光雷达, 采用四个探测通道分别用于同时接收对流层下部和中上部大气气溶胶 532 nm 和 1064 nm 波段消光系数垂直廓线和光学厚度的探测, 同时用于气溶胶尺度谱特征垂直分布的研究。利用窄带滤光片和可调谐的小孔光阑, 有效地压制了天空背景, 提高了系统的白天探测能力。采用高低层同时探测, 有效地缩短了获取大气信息的时间, 可以更好的反映气溶胶粒子的时空分布。给出了气溶胶消光廓线及其时空演变的探测结果, 进行

了大气气溶胶消光系数和光学厚度的对比实验并分析了大气气溶胶的 Angstrom 指数。可以看出, 双波长米散射激光雷达是一种探测大气气溶胶光学特性的有力工具, 为大气科学和环境科学研究以及大气红外辐射传输提供了有关气溶胶的光学参数。

参考文献:

- [1] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993 [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4941-4952.
- [2] Zhong Zhiqing, Zhou Jun. Simulated signal calculation for micro pulse lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(5): 618-622 (in Chinese).
钟志庆, 周 军. 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟计算 [J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 618-622.
- [3] Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun, et al. Measurement of stratosphere aerosol with L625 lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012-1015 (in Chinese).
吴永华, 胡欢陵, 周 军. L625 激光雷达探测平流层气溶胶 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012-1015.

- [4] Mao Minjuan, Zhang Yinchao, Fang Haitao, et al. Detection of aerosol distribution by atmospheric environment airborne lidar over Qingdao and adjacent sea area [J]. *Chinese J. Geophys*, 2007, **50**(2): 370-376 (in Chinese).
毛敏娟, 张寅超, 方海涛, 等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测 [J]. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 370-376.
- [5] Zhang Yinchao, Hu Huanling, Shao Shisheng, et al. Measurement of SO₂, NO₂ and O₃ in Beijing by DIAL [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 346-350 (in Chinese).
张寅超, 胡欢陵, 邵士勇, 等. 北京市大气 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的激光雷达监测实验 [J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 346-350.
- [6] Takamura T, Sasano Y, Hayasaka T. Tropospheric aerosol optical properties derived from lidar, sun photometer, and optical particle counter measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7132-7140.
- [7] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652-653.
- [8] Wang Zhihua, He Yinghong, Li Zhensheng, et al. Effects of backscatter extinction logarithmic ratio on the inversion of aerosol extinction coefficient [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 335-340 (in Chinese).
王治华, 贺应红, 李振声, 等. 气溶胶后向散射消光对数比对消光系数反演的影响研究 [J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 335-340.
- [9] Takamura T, Sasano Y, Hayasaka T. Tropospheric aerosol optical properties derived from lidar, sun photometer, and optical particle counter measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7132-7140.
- [10] Sasano Y, Nakane H. Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(1): 11-13.
- [11] Von der Gathen P. 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.

作者简介: 迟如利 (1974-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光雷达技术和激光大气遥感。