

三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例

刘 东¹ 陶宗明^{1,2*} 吴德成¹ 王珍珠¹ 王邦新¹ 钟志庆¹ 伯广宇¹
谢晨波¹ 周 军¹ 王英俭¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031)

摘要 大气气溶胶和卷云对地球-大气之间辐射收支平衡有重要的影响, 主要表现在它们的直接气候效应、间接气候效应以及它们之间的相互作用。为了深入研究大气气溶胶的微物理特性和卷云的物理性质, 开发研制了三波长拉曼偏振激光雷达系统, 它由发射、接收、控制与数据采集子系统组成。该激光雷达系统具有探测波长多、探测范围大、时间和空间分辨率高、灵敏度高和数据可靠等特点。由该激光雷达的数据可以反演 355、532、1064 nm 3 个波长上的后向散射系数, 355 nm 和 532 nm 两个波长上的消光系数以及 532 nm 波长上的退偏振比。个例研究结果表明该激光雷达系统数据可靠, 可以对气溶胶和卷云进行微物理性质的探测研究。

关键词 大气光学; 激光雷达; 气溶胶; 卷云

中图分类号 TN958.98; P401 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0228001

Development of Three-Wavelength-Raman-Polarization Lidar System and Case Study

Liu Dong¹ Tao Zongming^{1,2} Wu Decheng¹ Wang Zhenzhu¹ Wang Bangxin¹
Zhong Zhiqing¹ Bo Guangyu¹ Xie Chenbo¹ Zhou Jun¹ Wang Yingjian¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Section of Physics Teaching and Research, Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Atmospheric aerosol and cirrus clouds modulate the balance of the radiation budget between the earth and its atmosphere, through their direct, indirect effect and the reaction of each other. In order to study microphysical properties of atmospheric aerosol and physical properties of cirrus cloud, a three-wavelength-Raman-polarization lidar system is developed, which is composed of transmitter, receiver, control, and data acquisition subsystems. It has many advanced characteristics, such as multiply wavelengths, large detecting range, fine temporal and range resolution, good detection sensitivity and reliable data. The backscattering coefficients of 355, 532 and 1064 nm, extinction coefficients of 355 nm and 532 nm, and depolarization ratio of 532 nm can be retrieved from this lidar system. Case study indicates that the data acquired from this lidar are reliable and can be used for study of the microphysical properties of the aerosol and cirrus cloud.

Key words atmospheric optics; laser lidar; aerosol; cirrus cloud

OCIS codes 280.3640; 010.1110; 010.1615

1 引 言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的固体和液体微

粒共同组成的多相体系, 它的粒子直径从 0.002~100 μm , 存在时间可以从几秒到几年, 它的化学成

收稿日期: 2012-08-16; 收到修改稿日期: 2012-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(41075016, 40975010)资助课题。

作者简介: 刘 东(1977—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光雷达探测新技术的研发、数据应用研究和星载激光雷达探测技术及 A-Train 卫星序列数据分析和应用等方面的研究。E-mail: dliu@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

份很复杂。大气气溶胶在地球上的含量并不多,大部分在与人类活动密切相关的对流层内,但是它在地球-大气辐射收支过程中扮演了重要的角色。它不但通过散射和吸收太阳辐射,直接影响地-气之间的辐射收支平衡,还会作为凝结核参与云的形成,从而改变云的微物理和降水特性,间接地影响辐射收支平衡。它已经成为影响全球气候变化的最敏感的强迫因子,也是气候变化机制研究和制定减排政策时必需考虑的新的视角和切入点,是当今国际科学研究前沿。目前人们对于气溶胶的气候效应的科学认知程度仍比较低,其重要原因是缺乏大气气溶胶的物理、化学与光学特性观测的基础数据,特别是气溶胶的垂直分布信息^[1]。

卷云在全球出现的概率高达 30%^[2],它通过吸收地球表面长波辐射和反射太阳短波辐射,对地-气之间的辐射收支平衡有重要的影响^[3]。在理解和预测全球气候系统变化的研究中,卷云的辐射强迫是一个尚不能精确确定的影响因子,故卷云一直是大气科学领域中的一个热点研究内容。

大气探测激光雷达具有探测距离远、时空分辨率高等特点,因而是探测大气气溶胶和云的强有力的工具。其探测平台由地基发展至车载、机载和星载等^[4~7],探测技术也由原来的米氏散射探测^[7]发展为拉曼探测^[8]和高分辨率光谱探测^[9]等。

随着气溶胶科学及其气候效应的深入研究,人们已经不再满足于其光学参数的测量,而希望能够得到更多的气溶胶微物理参数。国内利用多波长拉曼激光雷达技术研究气溶胶和卷云未见报道;国外在这一方面的工作做得较多,如 Veselovskii 等^[10]利用多波长拉曼激光雷达反演出气溶胶的微物理参数,Biniotoglou 等^[11]把多波长拉曼激光雷达和云高仪结合起来,反演气溶胶的特性。利用 3 个米氏散射波长对高层卷云的同时测量,研究卷云后向散射系数的波长依赖关系,了解其物理性质,如粒子形状、尺度谱等。

为了深入研究气溶胶和云的特性,本文研制了三波长拉曼偏振激光雷达系统。利用这台激光雷达就可以获得 3 个波长上的后向散射系数、2 个波长上的消光系数和 1 个波长上的退偏振比廓线,从而为反演气溶胶的微物理参数和卷云的物理特性打下基础。本文给出了该三波长拉曼偏振激光雷达的原理框图和主要技术参数,通过精心的系统调试,获得了 6 个接收通道可靠的大气回波信号,并对卷云和大气气溶胶进行了实际探测。

2 激光雷达系统

当一束激光入射到大气中时,就要和大气中的粒子(包括大气分子和气溶胶)发生相互作用,产生散射光。光子能量不变的散射称为米氏散射或瑞利散射;光子能量改变的散射称为拉曼散射。若发射激光为线偏振光,因大气中的非球形粒子具有退偏特性,其后向散射光中就会包括平行(用 p 表示)和垂直(用 s 表示)于原线偏振光的 2 个偏振分量。激光雷达方程描述了后向散射光信号强度与探测距离以及大气中散射粒子光学性质之间的定量关系,它是设计三波长拉曼偏振激光雷达系统的基本依据。系统设计的探测高度指标:米氏散射通道探测气溶胶在晚上达到 15 km;拉曼通道探测气溶胶在晚上达到 8 km。

2.1 系统装置

三波长拉曼偏振激光雷达系统由发射、接收、控制和数据采集子系统组成,如图 1 所示。依据激光雷达方程、系统探测高度指标,用信噪比作为判断探测距离的标准,通过模拟计算的方法对激光器输出能量、望远镜的直径、后继光路分布和各分色片透射率和反射率等进行优化设计。发射子系统选用 Nd:YAG 激光器(型号为 Quantel Brilliant B),发射基频波长 1064 nm、二倍频 532 nm 和三倍频波长 355 nm,对应这 3 个波长处的脉冲能量分别为 280, 260, 160 mJ,其重复频率均是 10 Hz。接收装置选用卡赛格林望远镜,其主镜直径为 14 inch(1 inch=2.54 cm),后继光路把回波信号分为 6 路(其中 1064 nm、532 nm 平行、355 nm 为

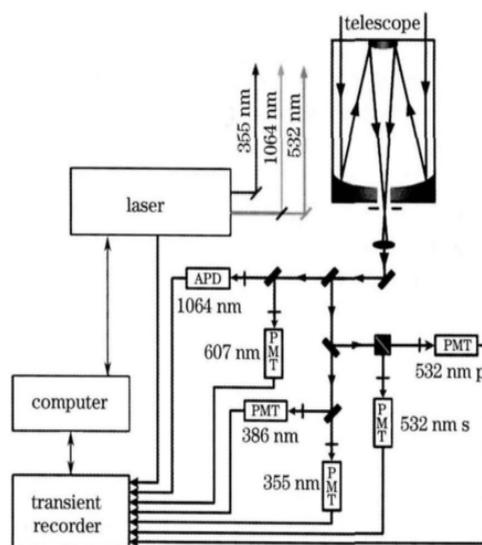


图 1 三波长激光拉曼偏振激光雷达方框图

Fig. 1 Block diagram of three-wavelength-Raman-polarization lidar

3 个米氏散射通道,607 nm、386 nm 为 2 个拉曼通道,532 nm 垂直为 1 个偏振通道),分别选用 5 个光电倍增管(PMT)和一个雪崩二极管(APD)来探测,工

控机来实现整个系统的时序控制,瞬态记录仪来进行数据的采集,它既可设置为模拟模式也可设置为光子计数模式。表 1 为该雷达系统的主要技术参数。

表 1 三波长拉曼偏振激光雷达系统主要技术参数

Table 1 Specifications of three-wavelength-Raman-polarization lidar

Laser	Nd ³⁺ YAG
Wavelength /nm	1064,532,355
Pulse energy /mJ	280, 260, 160
Repetition rate /Hz	10
Divergence /mrad	0.5
Telescope (Meade)	Cassegrain LX400-ACF-14"
Diameter /inch	14
Focal length /mm	2854
Interference filters	(bar corporation)
Bandwidth	1.0 nm for 6 channels
Peak transmittance	40%
Data acquisition	(transient recorder) Licel TR-20-160
Sampling rate /MHz	20
Photon counting rate /MHz	250
Detectors	
PMT	R7400U-02 for 532 nm p, 532 nm s and 607 nm, R7400U-03 for 355 nm and 386 nm
APD	Perkin & Elmer C30956E-TC for 1064 nm

后继光路的设计是优化和提高各通道探测灵敏度的关键技术之一。应遵循的原则是弱信号通道的光程要短,通过分色片时尽可能采用反射方式;分色片多于两个波长分色时,反射光的波长要全部大于(或小于)透射光的波长;分色片要镀膜,以提高反射率和透射率。依照上述设计原则,三波长拉曼偏振激光雷达系统的后继光路如图 1 所示。激光雷达信号的采集方法常用多通道模拟/数字(A/D)采集卡,这一方法是经济实惠,但抗干扰能力还有待改进。近年来德国 Licel 公司专门为激光雷达开发了一种信号采集与信号探测系统,该系统的抗干扰能力很强,信号很稳定,倍受青睐。因此选用 Licel 公司的信号采集与探测系统。

2.2 系统调试

三波长拉曼偏振激光雷达系统分二期建设,2010 年底完成了 3 个米氏散射通道,2011 年 10 月增加了 2 个拉曼通道和 1 个垂直偏振通道,实现了 3 个米氏散射通道、2 个拉曼通道和 1 个偏振通道的探测功能。经测试,6 个通道的信号基线(指系统处于正常工作状态但望远镜盖关闭时探测的回波信号)都是平直的,系统的参数设置能保证回波信号处于线性状态。经与所在地其他激光雷达同时探测的对比实验表明,该系统获得的 6 个通道回波信号是

可靠的。

米氏散射信号相对于拉曼信号一般要强得多。对于米氏散射信号,用模拟回波脉冲信号作为探测廓线;对于拉曼信号,采取模拟信号与光子计数信号拼接的方法获得一条探测廓线。具体的拼接原则和方法是先算出模拟信号和光子计数信号比值与高度的关系,找到与这一比值为近似常数的高度范围,则这个范围就是合适的拼接范围,并算出比值在这一范围内的平均值 K 。在拼接范围高度以下,用模拟信号;在拼接范围内,用模拟信号加上 K 倍光子计数信号后再除以 2;在拼接范围高度以上,用 K 倍光子计数信号,这样就获得一条完整的探测廓线。激光雷达垂直向上发射脉冲激光光束,望远镜收集大气中的后向散射光。单脉冲激光雷达信号一般较弱,取多次测量信号的平均值作为一条信号廓线。对于米氏散射信号,测量次数一般设置为 1000 次;对于拉曼散射信号,测量次数一般设置为 10000 次。

图 2 为 2012 年 4 月 26 日晚上 20:32 在合肥市西郊探测到的 6 个通道回波信号廓线,每条廓线由 10000 个回波信号平均而来。从图中可以看出,在夜晚探测的条件下,3 个米氏散射通道的探测距离都可达或超过 12 km,2 个拉曼通道和 1 个垂直偏振通道的探测距离约为 12 km。

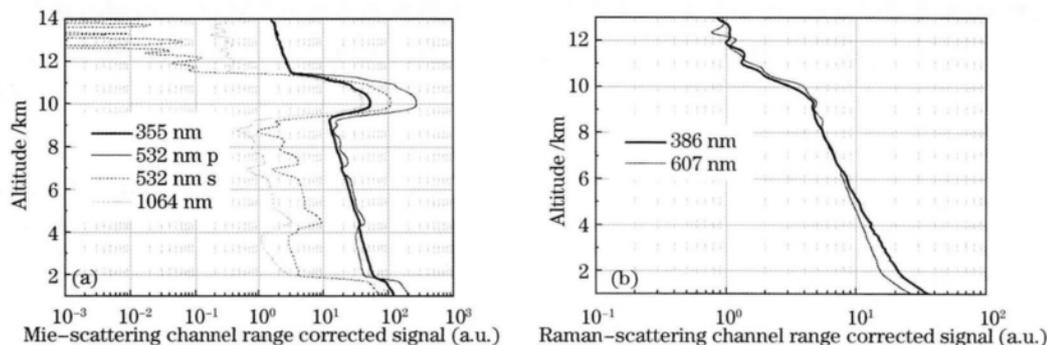


图 2 距离修正信号廓线。(a)米氏散射通道;(b)拉曼散射通道

Fig. 2 Range corrected signals. (a) Mie-scattering channel; (b) Raman-scattering channel

3 个例研究

选择 2012 年 4 月 26 日晚上 20...32 的探测结果作为个例来研究,具有一定的典型性,它在 10 km 左右有一个卷云层,同时在 2 km 以下有一个气溶胶层。这样在一条廓线中,可以同时分析卷云和气溶胶的相关特性。该激光雷达可以反演卷云的光学厚度、消光系数、退偏振比和后向散射系数颜色比等,可以反演气胶的后向散射系数、消光系数、激光雷达比和退偏振比等。由于篇幅关系,不具体介绍每一个量的反演方法,在下面的分析中会标出每一个量反演方法的相关文献。

3.1 卷云特性分析

从图 2 中可知,该次测量中在 10 km 高度上有一个卷云层,厚度约 2 km,且卷云的信号很强,故在卷云区域内,气溶胶的影响可以忽略。对于拉曼通道,不需要假设卷云或气溶胶的激光雷达比,就可以反演它们的消光系数^[8]。图 3 就是利用 2 个拉曼通道信号反演出气溶胶和卷云的消光系数廓线。图 4 是 532 nm 通道上的气溶胶和卷云的退偏振比廓线。

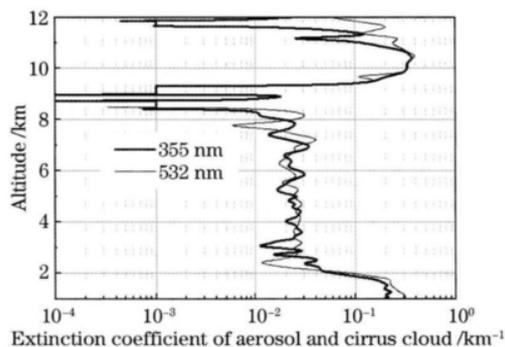


图 3 气溶胶和卷云消光系数廓线

Fig. 3 Extinction coefficients of aerosol and cirrus cloud

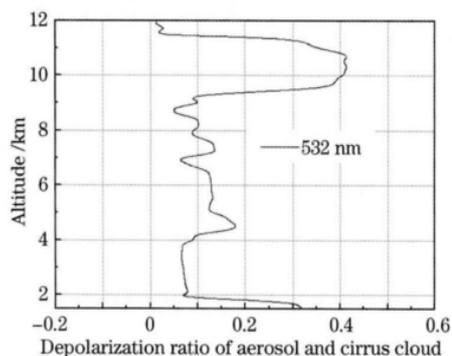


图 4 气溶胶和卷云退偏振比廓线

Fig. 4 Depolarization ratio of aerosol and cirrus cloud

从图 3 中可以看出,对于卷云的消光系数,2 个波长上反演出的结果在 9~11 km 高度上几乎相等;11 km 之后两者区别较大。从图 2 中得知,11 km 之后是卷云的边缘,拉曼信号较弱,这是造成 2 个消光系数不一样的原因。在 9~11 km 高度上,2 个拉曼通道上的消光系数几乎相等,证明了卷云的消光系数与波长无关,这一结论与理论分析是一致的^[12]。

从图 4 中可以看出,该次探测中卷云的退偏振比约为 0.4,而迟如利等^[13]报道合肥上空卷云的退偏振比一般在 0.2~0.5 之间,这与本文探测结果是相容的。

结合米氏散射通道和拉曼通道,可以计算卷云的消光-后向散射系数比(又称激光雷达比)。本次探测的反演结果:在 532 nm 和 355 nm 波长上,卷云的激光雷达比都是 21 sr。卷云的后向散射颜色比也是卷云的一个特性,利用文献^[14]中的方法,计算出本次卷云的结果: $\beta_{c,1064\text{ nm}}/\beta_{c,532\text{ nm}} = 0.6$, $\beta_{c,532\text{ nm}}/\beta_{c,355\text{ nm}} = 1.0$, $\beta_{c,1064\text{ nm}}/\beta_{c,355\text{ nm}} = 0.6$ 。

3.2 气溶胶特性分析

气溶胶后向散射系数与波长的关系一般可表达为 $\beta_{\lambda_1}/\beta_{\lambda_2} = (\lambda_1/\lambda_2)^{-\omega}$, 其中 ω 为波长指数, 它的范围为 $-1 \sim 4$, 其数值大小与气溶胶粒子的尺度大小呈负相关关系, 即 ω 的数值越小, 气溶胶粒子的尺度就越大; ω 的数值越大, 气溶胶粒子的尺度就越小^[15]。图 5 是用 Fernald 方法^[16] 反演出的 3 个波长上云和气溶胶后向散射系数廓线。很明显, 在 2 km 高度以下一个厚的气溶胶层, 约在 4~8 km 范围内有一个薄的气溶胶层, 并且这两层的气溶胶后向散射系数与波长的依赖关系是不同的。在厚的气溶胶层中, 后向散射系数波长指数为负值; 在薄的气溶胶层中, 后向散射系数波长指数为正值。这表明厚的气溶胶层中气溶胶粒子的尺度要大于薄层中的

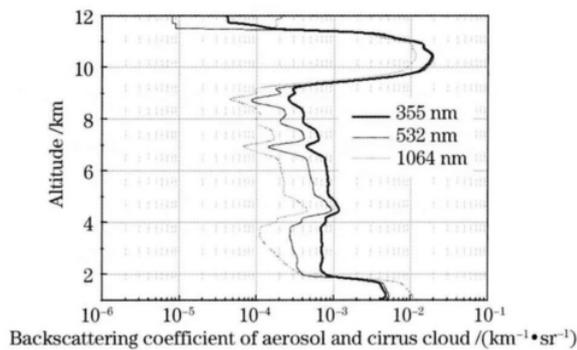


图 5 气溶胶和卷云的后向散射系数廓线

Fig. 5 Backscattering coefficients of aerosol and cirrus cloud

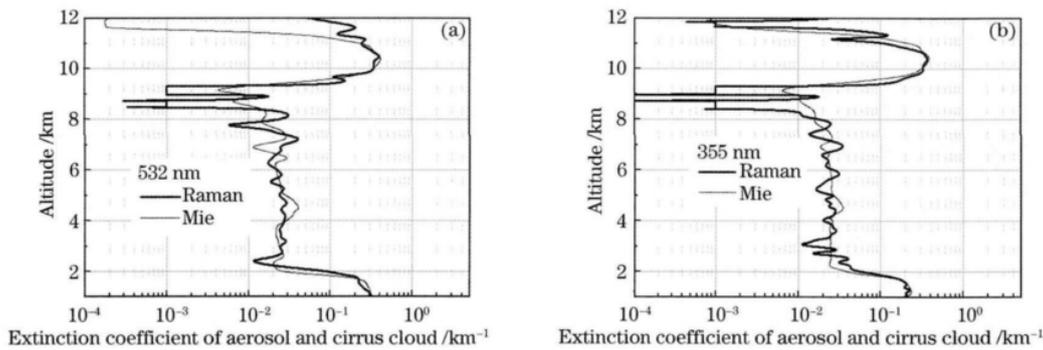


图 6 气溶胶和卷云的消光系数廓线。(a) 532 nm; (b) 355 nm

Fig. 6 Extinction coefficients of aerosol and cirrus cloud. (a) 532 nm; (b) 355 nm

4 结 论

成功研制出了三波长拉曼偏振激光雷达系统, 个例探测结果表明该激光雷达系统数据是可靠的。实现了 6 个通道的数据探测, 在夜晚探测的条件下, 6 个通道探测距离达到或超过 12 km。研究了廓线

气溶胶粒子尺度。本文中的测量时间是在夜晚, 大气中尺度大的气溶胶沉降至底层, 这与探测结果是吻合的。

这两层气溶胶的激光雷达比也是不同的, 本次探测的反演结果: 厚的气溶胶层在 532 nm 和 355 nm 波长上, 激光雷达比分别为 60 sr 和 50 sr; 薄的气溶胶层在 532 nm 和 355 nm 波长上, 激光雷达比分别为 45 sr 与 30 sr。在 532 nm 波长, 厚的气溶胶退偏振比可达 0.32(见图 4)。

3.3 米氏散射通道与拉曼通道的比对

米氏散射激光雷达和拉曼散射激光雷达都可以反演气溶胶和云的消光系数, 但单一米氏散射激光雷达反演气溶胶和云的消光系数精度没有拉曼散射激光雷达的高。利用拉曼散射反演出的气溶胶和云的激光雷达比, 可以提高米氏散射激光雷达反演气溶胶和云消光系数的精度。图 6 是两种方法反演出的气溶胶和卷云在 2 个波长上的消光系数廓线。在每一个波长上, 两种方法的反演结果在细节上有区别, 但宏观廓线大致一样。在细节上, 拉曼方法反演出的结果波动较大, 并且对小的气溶胶峰不敏感, 这是因为拉曼方法是对探测信号进行微分运算, 微小的信号误差会被放大, 导致反演出的结果波动较大。同样的原因导致两种方法在卷云的上下边缘反演结果不一样。在宏观廓线上, 两种方法反演结果大致一样, 表明这两种方法是自洽的, 反演结果是正确的。

中包含气溶胶和卷云的探测个例, 得到了可靠的气溶胶和卷云后向散射系数、消光系数和激光雷达比等信息。

参 考 文 献

1 Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua *et al.*. The radiative and

- climatic effects of atmospheric aerosols[J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2008, **32**(4): 826~840
石广玉, 王 标, 张 华 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, **32**(4): 826~840
- 2 D. P. Wylie, W. P. Menzel. Eight years of high cloud statistics using HIRS[J]. *J. Climate*, 1999, **12**: 170~184
- 3 M. B. Baker. Cloud microphysics and climate[J]. *Science*, 1997, **276**(5315): 1072~1078
- 4 Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia *et al.*. Polarization lidar observations of cirrus clouds and Asian dust aerosols over Hefei [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2003, **27**(6): 1093~1100
刘 东, 戚福弟, 金传佳 等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, **27**(6): 1093~1100
- 5 Zhang Gaixia, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Slant measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1015~1019
张改霞, 张寅超, 胡顺星 等. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程探测[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1015~1019
- 6 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi *et al.*. Study on airborne scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2584~2589
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅 等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2584~2589
- 7 D. M. Winker, W. H. Hunt, M. J. McGill. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L19803
- 8 A. Ansmann, M. Riebesell, U. Wandinger *et al.*. Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio[J]. *Appl. Phys. B*, 1992, **55**(1): 18~28
- 9 Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1548~1553
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高分辨率激光雷达原理[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1548~1553
- 10 I. Veselovskii, A. Kolgotin, D. Müller *et al.*. Information content of multiwavelength lidar data with respect to microphysical particle properties derived from eigenvalue analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(25): 5292~5303
- 11 I. Binietoglou, A. Amodeo, G. D'Amico *et al.*. Examination of possible synergy between lidar and ceilometer for the monitoring of atmospheric aerosols [C]. *SPIE*, 2011, **8182**: 818209
- 12 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: Wiley, 1983. 130~136
- 13 Chi Ruli, Liu Houtong, Wang Zhenzhu *et al.*. Observations of cirrus clouds using polarization Mie lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(9): 1295~1300
迟如利, 刘厚通, 王珍珠 等. 偏振-米氏散射激光雷达对卷云的探测[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(9): 1295~1300
- 14 Z. Tao, D. Liu, Z. Zhong *et al.*. Measurements of cirrus cloud with a three-wavelength lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(5): 050101
- 15 Yan Shunsheng, Hu Shunxing, Hu Huanling *et al.*. Uncertainty analysis of aerosol wavelength exponent measured by Raman-Mie lidars[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 667~672
闫顺生, 胡顺星, 胡欢陵 等. RML探测大气气溶胶波长指数的不确定分析[J]. 激光技术, 2008, **32**(6): 667~672
- 16 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653

栏目编辑: 王晓琰