

南京北郊气溶胶观测

曹念文¹ 施建中¹ 张莹莹¹ 杨丰恺¹ 田力¹ 卜令兵¹ 夏俊荣¹ 严家德¹ 颜鹏²

(¹ 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044; ² 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081)

摘要 介绍了南京北郊大气气溶胶观测及其数据分析结果。利用 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达系统对南京北郊气溶胶进行常规观测, 并对观测数据进行反演分析。详细分析了米氏散射气溶胶消光系数的反演结果随边界值变化的灵敏度, 提出了较为准确的气溶胶边界值的确定方法, 由此得到较为准确的气溶胶光学参数。通过与地面观测结果的比较, 说明了 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达的观测结果具有可比性, 其边界值的确定及其反演方法在一定程度上可信, 可行。

关键词 激光雷达; 消光系数; 气溶胶; 南京北郊

中图分类号 X831 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.060101

Aerosol Measurements by Raman-Rayleigh-Mie Lidar in North Suburb Area of Nanjing City

Cao Nianwen¹ Shi Jianzhong¹ Zhang Yingying¹ Yang Fengkai¹ Tian Li¹
Bu Lingbing¹ Xia Junrong¹ Yan Jiade¹ Yan Peng²

¹ Atmospheric Physics School, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China

² Center for Atmosphere Watch and Services, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract This paper presents the aerosol measurements in north suburb area of Nanjing and the analysis results. The aerosol in north suburb area of Nanjing is measured regularly by Raman-Rayleigh-Mie lidar system, and the results are analyzed. Variation of calculation result of aerosol extinction coefficient with boundary value is discussed in detail. The method for selecting more accuracy boundary value is suggested, and based on which, more accurate aerosol extinction coefficient is obtained. By comparing with other ground-based measurement results, it is indicated that aerosol Raman-Rayleigh-Mie lidar measurement results are comparable, and the method for boundary-value selection and aerosol extinction coefficient calculation is reliable.

Key words lidar; extinction coefficient; aerosol; north suburb area of Nanjing

OCIS codes 010.1350; 010.3640

1 引言

气溶胶是影响大气污染的重要因素之一, 对其观测研究一直受到高度重视^[1]。激光雷达是一种非常有效的观测方法, 与其它遥感观测手段如卫星、地面观测相比具有较高的时空分辨率。

尽管激光雷达广泛应用于大气气溶胶观测, 但还存在如下局限性: 米氏散射激光雷达测量气溶胶, 数据处理时存在较多的假设条件, 定性的研究较多, 定量的研究较少, 来自参考文献的参数设定毕竟和实测的大气参数存在一定的差距, 实测大气存在时空变化^[2,3]。特别是不同边界条件的设定对气溶胶光学参数的反演存在很大影响, 边界值的大小对高空气溶胶消光系数的计算结果变化灵敏度影响很大^[4~6]。一般情况下, 先假定一个边界值, 对激光雷达观测的气溶胶数据进行空间反演, 这样对反演的结果没有一定参考比较, 存

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-29; 网络出版日期: 2012-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(41175033)和公益性行业科研专项(GYHY201006047-5)资助课题。

作者简介: 曹念文(1967—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: nwcao@yahoo.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

在一定的不确定性;或者通过其它观测手段得知当时当地的气溶胶光学参数,以此参数为边界值进行反演得到的气溶胶消光系数廓线,相对来说,比较准确,但必需得到其它气溶胶观测资料。

本文通过观测资料的波形特征来判断气溶胶数据反演的正确性。通过比较高空的拉曼(Raman)信号、瑞利信号和低空的米氏(Mie)散射信号,确保低空激光束落在望远镜的视场角内。这样就可确保 Mie 散射距离校正回波信号随距离的增大而逐渐减小并趋近于零。根据 Mie 散射激光雷达回波信号反演气溶胶消光系数,得到气溶胶消光系数廓线,通过调整边界值大小,可以发现气溶胶消光系数廓线特别是在较高空间位置发生明显变化,不断微调边界值,直到气溶胶消光系数廓线变化甚微,并且和气溶胶的距离校正信号波形相似。这时可以确定,气溶胶边界值接近于真实值,气溶胶的消光系数廓线较为准确。

2 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达系统

南京位于中国沿海和长江流域两大经济带交汇处,是长江三角洲经济核心区重要城市。南京的空气污染极其严重,大量工业燃烧以及季节性农业秸秆焚烧产生的黑碳、硫酸盐等不同化学成分气溶胶颗粒都排放到大气中,大量汽车尾气的排放对城市居民的生活也带来很大危害;另外根据相关科学研究和当地气象观测报道,自 2000 年以来,春天北方沙尘时常袭击南京,对南京地区造成严重污染;灰霾、雾的存在也是南京天气的主要特点^[7]。Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达系统建立于中国气象局-南京综合气象观测基地(118.7 E, 32.2 N),对南京北郊气溶胶进行常规试验观测。观测系统示意图如图 1 所示。

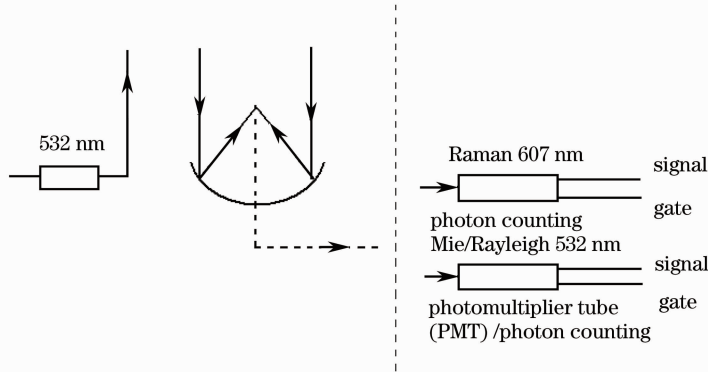


图 1 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Raman-Rayleigh-Mie lidar system

该激光雷达系统激光光源波长为 532 nm,频率为 10 Hz,望远镜直径为 50 cm,回波信号由三个通道接受,一个氮 Raman 光子技术器通道接受氮拉曼回波,波长 607 nm,该通道工作时间由一门控信号控制;一个为低空 Mie 散射回波通道,该通道为光电倍增管;另一个为高空 Rayleigh 散射通道,考虑到光电倍增管动态范围的限制,高空信号为弱瑞利(Rayleigh)信号,该通道由门控信号控制,在低空 Mie 散射通道工作后,过一段时间延迟 Rayleigh 信号通道开始数据采集,这样便确保该通道不受低空 Mie 散射强信号的影响而饱和。这样整个 532 nm 的散射信号是由低空 Mie 散射信号和高空 Rayleigh 散射通道拼接而成。

3 观测结果的数据分析

用 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达在夜晚时间对当地对流层及以上高度的大气进行实时探测。该观测为常规观测,通过观测信号可以发现当地大气气溶胶的时空变化特性。本文重点讨论数据分析方法,讨论边界值对气溶胶大气参数反演结果的影响。

图 2 为 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达在南京信息工程大学中国气象局试验综合观测基地的观测数据,图 2(a)为 Rayleigh 散射信号,为防止低空信号饱和和损毁光子计数器, Rayleigh 通道有门控信号控制,在 25 km 处 Rayleigh 通道开始采集数据;图 2(b)为氮 Raman 通道的采集数据, Raman 信号很微弱;图 2(c)为 Rayleigh 信号和 Raman 信号的强度比,从图中可以看出 Raman 信号很微弱,比 Rayleigh 信号弱很多,最大峰值只有 Rayleigh 的 1/6;图 2(a), (b), (c) 的信号都是距离平方校正信号,从图中可以看出, Rayleigh 信号

可以达到 150 km, Raman 高空信号很微弱, 图中只显示 50 km 的数据, 从这些距离平方矫正信号可见, 激光束完全落在望远镜的视场角内, 从而确保了 Mie 通道的气溶胶散射光完全被望远镜接受, 图 2(d) 是 Mie 通道的气溶胶的距离平方矫正信号。综合图 2(a), (b), (c), (d) 激光雷达不同通道回波信号, 可以看出, 该激光雷达系统的激光光路调试能确保激光光束和望远镜光轴平行并且完全落在望远镜视场角内, 因而 Mie 通道气溶胶消光系数的反演结果可以参考 Mie 通道气溶胶距离平方矫正信号波形。从图 2(d) 可以看出从 1.5~2.0 km 存在一个气溶胶层, 激光穿过该气溶胶层, 回波能量衰减得很少, 距离平方矫正信号稳定, 信号经过平均后, 波形和时间轴接近平行。根据气溶胶长期观测经验, 一般情况下大气边界层气溶胶密度比较大, 上层的空气比较稳定, 干净, 气溶胶的消光系数比低层气溶胶的消光系数小, 一般稳定在一定的数值。调整边界值大小, 使得气溶胶消光系数曲线与气溶胶距离平方信号相接近, 得到较为准确的气溶胶消光系数。

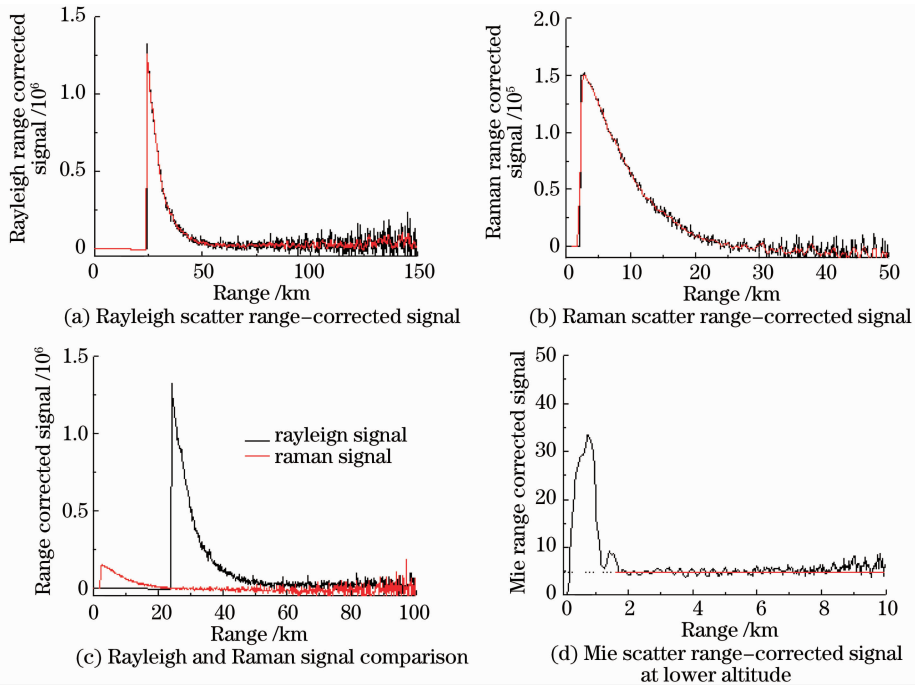


图 2 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达于南京北郊的气溶胶观测结果

Fig. 2 Raman-Rayleigh-Mie lidar aerosol measurements in Nanjing suburb area

该激光雷达系统 Mie 散射通道数据采集卡为 2048 个点, 距离分辨率为 30 m, 从理论上来说, 最高应该可以采集到 60 km 高空的数据, 但是实际上由于光电倍增管的动态范围限制, 只能较为准确地采集到低空部分的气溶胶数据。这里只分析低空气溶胶回波信号, 高空信号微弱, 再加上噪声的影响, 不予分析。本次实验观测, 取 0.3~5.0 km 区间内的气溶胶回波信号为可靠数据。

用 klett 方法进行气溶胶消光系数反演^[4], 先通过假定当地气溶胶消光系数边界值, 通过反演计算得到气溶胶消光系数廓线, 气溶胶消光系数廓线与边界值关系很大, 气溶胶消光系数的空间分布与边界值的设定变化很敏感。不同边界值的设定导致气溶胶消光系数很大起伏, 气溶胶消光系数廓线发生变化, 通过微调气溶胶消光系数边界值, 使得气溶胶消光系数廓线在低空和高空部分都相接近, 并且和气溶胶的距离平方矫正信号相波形相似, 根据一定的理论分析和长期观测的经验可知这时反演所得气溶胶消光系数较为准确、可靠。

图 3 为 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达的气溶胶观测结果及数据分析(I), 图 3(a) 为 Mie 散射通道气溶胶散射回波, 图 3(b) 为 Mie 散射回波的距离平方矫正信号。从图 3(b) 可以看出在 1.2 km 以上距离平方矫正信号很小, 比较稳定, 这说明激光穿过低空的大气边界层以后(1.2 km 以上)激光的散射回波能量小并且稳定, 没有起伏, 表明 1.2 km 以上高度空气很洁净, 气溶胶含量少。图 3(c) 是气溶胶观测数据的反演分析结果, 改变气溶胶边界值的大小, 反演得到气溶胶消光系数廓线起伏变化, 先设定 11 个不同大小的边界值: 1×10^{-4} 、 0.8×10^{-4} 、 0.6×10^{-4} 、 0.4×10^{-4} 、 0.2×10^{-4} 、 1×10^{-5} 、 0.8×10^{-5} 、 0.6×10^{-5} 、 0.4×10^{-5} 、 0.2×10^{-5} 、 1×10^{-6} 。从图 3(c) 可以看出, 不同边界值对应的气溶胶消光系数廓线都存在起伏, 边界值设为

1×10^{-4} 、 0.8×10^{-4} 、 0.6×10^{-4} 、 0.4×10^{-4} 、 0.2×10^{-4} 的气溶胶参数廓线在高空部分有很大起伏,且和距离平方矫正信号的波形差异很大;边界值设为 0.4×10^{-5} 、 0.2×10^{-5} 、 1×10^{-6} 的气溶胶消光系数反演结果,在低空部分存在很大起伏,和距离平方矫正信号也不相似;边界值设为 1×10^{-5} 、 0.8×10^{-5} 、 0.6×10^{-5} 的气溶胶数据反演廓线在低高空部分都想接近,特别是在高空部分的反演结果几乎完全重合,并且和距离平方矫正信号波形非常吻合。这说明边界值为 1×10^{-5} 、 0.8×10^{-5} 、 0.6×10^{-5} 的气溶胶消光系数的反演结果比较准确。

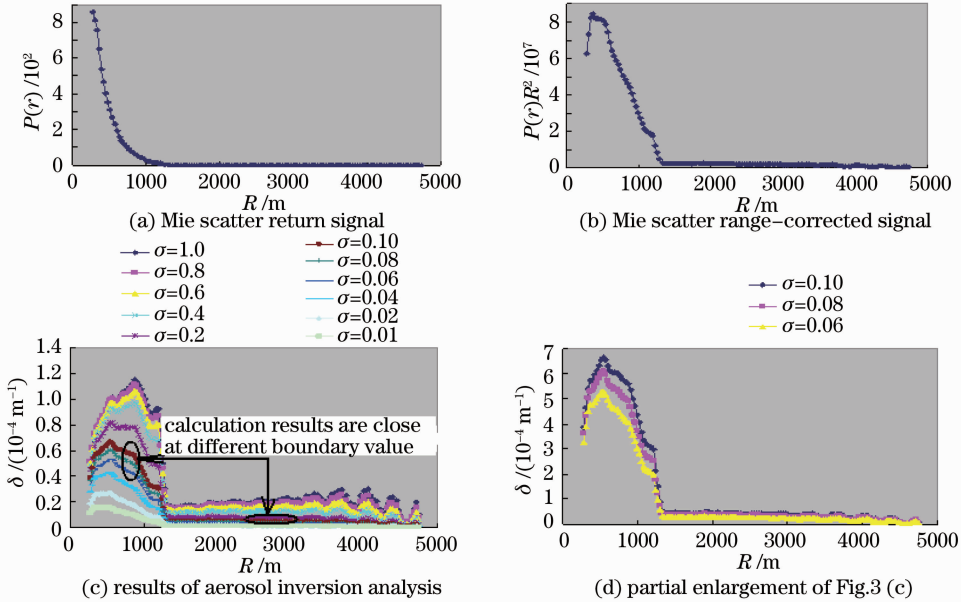


图3 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达在南京北郊气溶胶的观测结果(I)

Fig. 3 Raman-Rayleigh-Mie lidar aerosol measurements in Nanjing suburb area (I)

图4为Raman-Rayleigh-Mie激光雷达气溶胶的观测结果及数据分析(II)。气溶胶反演计算的结果和图3相似,从图4(c)可以看出:当边界值为 1×10^{-5} 、 0.8×10^{-5} 、 0.6×10^{-5} 时,反演所得的气溶胶消光系数廓线在低高空部分都相接近,特别是在高空部分反演的消光系数廓线几乎重叠,并且这组反演的气溶胶参数廓线与气溶胶距离平方矫正信号图4(b)波形相似。图3与图4的观测时间相接近,且在同一观测地点,这说明观测的气溶胶光学特性在高空部分接近。图3(d)和图4(d)在高空部分反演结果基本相吻合,低空部分属

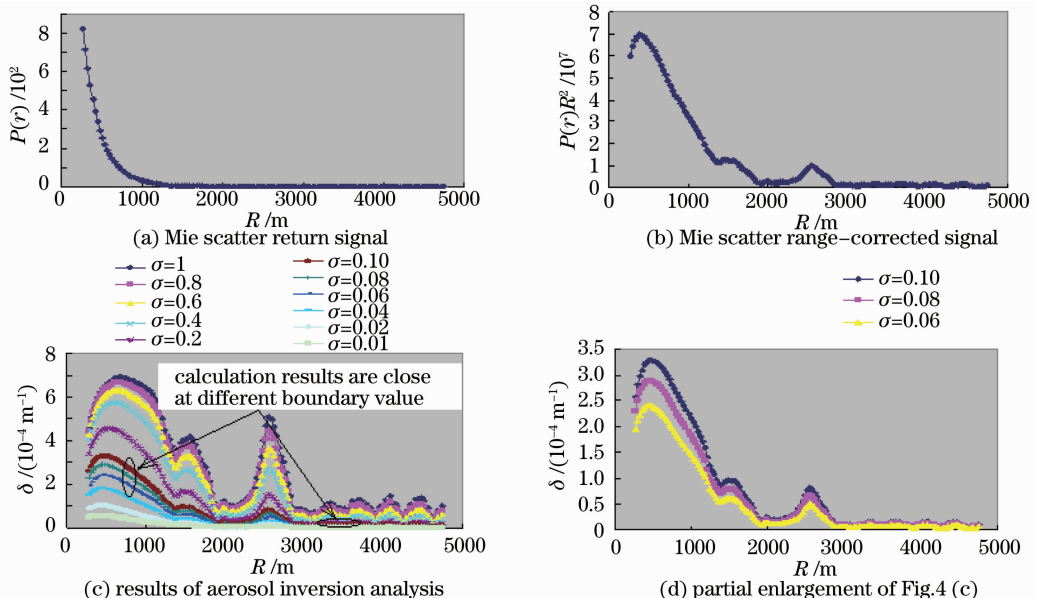


图4 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达在南京北郊气溶胶的观测结果(II)

Fig. 4 Raman-Rayleigh-Mie lidar aerosol measurements in Nanjing suburb area (II)

大气边界层底部,气溶胶的分布不稳定,与适时观测的天气条件有关。

4 和地面观测结果的比较

在激光雷达观测气溶胶的同时,地面观测仪器一直在进行大气气溶胶观测。例如,浊度仪的气溶胶观测,浊度仪型号为 TSI Model 3563 Nephelometer,波长分别为:450 nm (blue), 550 nm (green), 700 nm (red/infrared), 三波长的频率宽度都为 40 nm。该浊度仪安装在南京信息工程大学校园内气象楼 12 楼实验室内,对窗外空气进行在线监测。观测的结果:蓝光总体散射系数为 $3\sim 5\times 10^{-4}$,绿光总体散射系数为 $2\sim 3\times 10^{-4}$,红光总体散射系数为 $1.5\sim 3\times 10^{-4}$,蓝光散射系数大概为 $4\sim 5\times 10^{-5}$,绿光散射系数大约为 $2\sim 4\times 10^{-5}$,红光散射系数大约为 $3\sim 4\times 10^{-5}$ 。总体的散射系数大约比后向散射系数大一个数量级。浊度仪测量的气溶胶后向散射系数与总散射系数之间的关系主要依赖于气溶胶的粒径谱分布,根据 TSI3563 浊度仪在华北城郊地区测量结果,气溶胶后向散射系数大概是总散射系数的 10%~20% 左右^[8]。

从浊度仪的观测结果可以看出,单波长气溶胶散射系数为 10^{-5} 数量级,和激光雷达(单波长:532 nm)的观测反演结果(10^{-5} 数量级)相吻合,这表明本文阐述的气溶胶的反演、边界值的确定方法可行,气溶胶的观测结果具有一定的可比性。

5 讨 论

1) 该 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达系统的观测数据有 Mie、Rayleigh、Raman 回波信号可以用来测量大气温度和气溶胶。本文主要讨论低空 Mie 通道气溶胶散射信号分析,对大气温度的测量结果暂不作分析。利用 Rayleigh、Raman 信号对激光雷达系统进行定标,高空能观测到能量微弱的 Rayleigh 和 Raman 信号,确保激光光束完全落在望远镜的视场角内,Mie 散射回波距离平方矫正信号波形能完全反映激光束落在望远镜的视场角内,距离平方矫正信号反映激光束传输过程中的能量衰减过程,激光能量逐渐衰弱,在高空部分,回波很小基本稳定,由于高空的大气气溶胶稀薄,空气洁净,这时距离平方矫正信号的波形在高空部分基本和回波信号的时间轴接近平行,Mie 散射信号的距离平方矫正信号的波形基本上和大气气溶胶的消光系数廓线相似,即 Mie 散射信号的距离平方矫正信号的波形走势能反映大气气溶胶的空间分布。因此在大气气溶胶光学参数的空间反演过程中,可以此为参考来判断气溶胶光学参数反演的正确性。

2) 在气溶胶光学参数的反演过程中,边界值的设定对反演结果的正确性存在很大影响,在不同边界值条件下反演得到的气溶胶光学参数差异很大,很难确定反演结果的准确性,但是反演结果的差别应该和边界值的变化值相关,边界值变化越大,反演结果相差越大。在反演过程中,离真实边界值越近的边界值反演的结果越接近于真实的气溶胶光学参数廓线。所以从不同边界值反演得到的气溶胶光学参数廓线中,波形接近的气溶胶廓线为较为准确的气溶胶光学参数廓线,与其相对应的边界值为较为真实的边界值。

6 结 论

通过 Raman-Rayleigh-Mie 激光雷达系统 Raman 和 Rayleigh 信号对激光雷达系统的光路进行定标,确保激光光束完全落在望远镜的视场角内;调试边界值的大小,使反演的气溶胶光学参数廓线在低高空部分都相接近,并且波形和气溶胶距离平方矫正信号相似,从而得到较为准确的边界值和相对可靠的气溶胶光学参数。反演的结果和地面观测仪器的观测结果相比,确保了数据的可比性。

参 考 文 献

- 1 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Retrieval of polluted aerosol optical properties over coastal water[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2011, **48**(6): 060101
王家成, 乔延利, 杨世值 等. 近海污染大气气溶胶光学性质反演研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 060101
- 2 N. Cao, T. Fukuchi, T. Fujii *et al.*. Error analysis of NO₂ DIAL measurement in the troposphere[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**: 141
- 3 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Stratosphere aerosol measurements by L625 Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*,

- 2001, **21**(8): 1012~1015
- 吴永华, 胡欢陵, 周 军 等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. 光学学报, 2001, **21**(8): 1012~1015
- 4 Chen Tao, Wu Decheng, Liu Bo *et al.*. A new method for determining aerosol backscatter coefficient boundary value in the lower troposphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1531~1536
- 陈 涛, 吴德成, 刘 博 等. 低层大气中确定气溶胶后向散射系数边界值的新方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1531~1536
- 5 Liu Houtong, Ge Zhangqi, Wang Zhenzhu *et al.*. Extinction coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by fernald iterative backward integration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1837~1844
- 刘厚通, 葛占旗, 王珍珠 等. 利用 Fernald 迭代后向积分法反演低空探测机载激光雷达消光系数[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1837~1844
- 6 J. D. Klett. Extinction boundary value algorithms for lidar inversion[J]. *Appl Opt*, 1986, **25**(15): 2462~2464
- 7 Liu Hongnian, Hu Rongzhang, Zhang Meigen. The study for numerical forecast of haze in Nanjing[C]. The National Conference About Particulate Pollution Measurement, 2008, Guangzhou, 95~100
- 刘红年, 胡荣章, 张美根. 南京城市灰霾数值预报方法研究[C]. 全国颗粒物污染防治与监测技术交流研讨会, 2008, 广州, 95~100
- 9 N. Ma, C. S. Zhao, A. Nowak *et al.*. Aerosol optical properties in the North China plain during HaChi campaign: an in-situ optical closure study[J]. *Atmos. Chem. & Phys.*, 2011, **11**(12): 5959~5973