

# 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法

陈涛<sup>1,2</sup> 赵玉洁<sup>1</sup> 刘东<sup>2</sup> 于杰<sup>1</sup> 徐灵芝<sup>1</sup> 王英俭<sup>2</sup> 周军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>天津市滨海新区气象局, 天津 300457  
<sup>2</sup>中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 利用一种新的自适应定标反演方法在有效探测高度内确定标定值, 反演微脉冲激光雷达(MPL)回波信号, 并同另外一台激光雷达系统在相同时间、相同地点的探测结果进行了对比。对比结果显示利用该方法得到的结果能够同大气实际情况吻合地较好。应用该算法对连续 12 h 的观测(共 25 组)数据进行批处理, 结果正确反映了当时的天气状况。这说明该算法应用于 MPL 信号处理时具有很好的稳定性。

**关键词** 激光雷达; 微脉冲激光雷达; 大气气溶胶; 后向散射系数; 标定值

中图分类号 P407.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0514001

## Inversion of Micro-Pulse Lidar Signals with a New Calibration Method

Chen Tao<sup>1,2</sup> Zhao Yujie<sup>1</sup> Liu Dong<sup>2</sup> Yu Jie<sup>1</sup> Xu Lingzhi<sup>1</sup> Wang Yingjian<sup>2</sup> Zhou Jun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Meteorological Administration of Tianjin Binhai New Area, Tianjin 300457, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A new self-adaptive method to determine the calibration value in the effective distance of micro-pulse lidar (MPL) is proposed. A profile of aerosol backscatter coefficient, which is retrieved from MPL signal with the boundary value determined using the new method, is compared with the one retrieved from another lidar signal with the boundary value assumed around the troposphere. The comparison shows that the two profiles seem to be consistent with each other well. A group of lidar signal, observed continuously 12 hours, is retrieved with this method, which can accurately indicate the weather conditions. The result shows that the method has a good stability.

**Key words** lidar; micro-pulse lidar; aerosol; backscatter coefficient; calibration value

**OCIS codes** 280.1100; 010.3640; 290.1350

## 1 引言

由于对太阳辐射的散射、吸收以及对云和降水的影响, 大气气溶胶已经成为影响全球气候变化的一个重要因子<sup>[1~3]</sup>。随着激光技术的发展, 激光探测手段在大气探测领域中越来越凸显出重要的作用。激光雷达作为一种主动遥感设备, 能够提供大气气溶胶高分辨率的时空分布, 被广泛应用于大气气溶胶的研究中<sup>[4~7]</sup>。利用激光雷达信号反演大气气溶胶光学性质参数通常采用 Fernald(弗纳尔德)方法。在利用 Fernald 方法反演大气气溶胶后向散射系数时需要选择一个高度  $z_c$  作为标定高度, 并且

需要确定该高度处气溶胶后向散射系数值  $\beta_a(z_c)$ , 以作为求解大气气溶胶后向散射系数的标定值。目前被广泛采用的方法是在对流层顶附近选取一个气溶胶含量最小的高度作为标定点, 并假设在该标定点上的气溶胶的散射比为某一定值<sup>[7]</sup>。但对于近些年来发展起来的一种新型的激光雷达系统-微脉冲激光雷达(MPL), 其有效探测范围通常较低, 无法在对流层顶附近设定标定值, 这时标定高度与标定值的合理选取成为正确反演气溶胶后向散射系数的关键<sup>[5,8]</sup>。

本文利用一种新的自适应定标算法, 对 MPL

收稿日期: 2011-10-31; 收到修改稿日期: 2012-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(41075016)和天津市气象局科研资助课题。

作者简介: 陈涛(1984—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光雷达技术及大气遥感探测等方面的研究。

E-mail: chent007@mail.ustc.edu.cn

回波信号进行反演,在有效探测高度内确定标定值。利用另一台激光雷达的反演结果以及探空资料进行对比验证,确定该方法的稳定性。同时对地面观测结果进行了分析,反演结果很好地表现了雾的形成过程。

## 2 定标方法

利用激光雷达方程,大气气溶胶后向散射系数和大气气溶胶消光系数可以通过传统的 Fernald 反演方法得到<sup>[9,10]</sup>。在 Fernald 反演方法中假定了两个参数,即标定高度处大气气溶胶后向散射系数  $\beta_a(\lambda, z_c)$ 、大气气溶胶消光散射比  $S_a$ 。其中  $S_a$  的值对于 532 nm 波长一般设定为 50 sr。对于探测对流层结构的激光雷达来说,  $\beta_a(\lambda, z_c)$  可以通过在气溶胶含量很微小的对流层顶附近假设散射比  $R=1.01$  来获得<sup>[11,12]</sup>。其中标定高度  $z_c$  通常是选取距离矫正回波信号  $P(\lambda, z)z^2$  与分子后向散射系数  $\beta_m(\lambda, z)$  比值最小的高度来确定。而微脉冲激光雷达的有效反演高度通常为 3~6 km,在这个高度范围内大气气溶胶的含量随天气的变化会有一些的改变,选择一个固定的散射比来确定标定值  $\beta_a(\lambda, z_c)$  的方法显然存在很大缺陷。为解决 MPL 回波信号反演问题中的定标问题,需对激光雷达方程进行整理、变换。

首先,假设激光雷达方程中大气总后向散射系数和大气总消光系数之间存在指数关系:

$$\beta(z) = C_2 \alpha(z)^k. \quad (1)$$

则激光雷达方程可以写成<sup>[10]</sup>:

$$P(z) = C_1 C_2 T_0^2 \frac{\alpha(z)^k}{z^2} \exp\left[-2 \int_{z_0}^z \alpha(z) dz\right], \quad (2)$$

对于  $k=1$ , (2) 式可求解为

$$\sigma(z) = \frac{S(z)}{C_1 C_2 T_0^2 - 2I(z_0, z)}, \quad (3)$$

式中  $S(z) = z^2 P(z)$ ,  $I(z_0, z) = \int_{z_0}^z S(z) dz$ 。

对比 (2)、(3) 式可以看出,对于相同的  $z_0$ , 两式中存在一个相同的因子  $C_1 C_2 T_0^2$ , 对两式进行合并、整理,消去因子  $C_1 C_2 T_0^2$ , 可以得到<sup>[5]</sup>:

$$\frac{P(z)z^2}{\alpha(z)} \left\{ \exp\left[2 \int_{z_0}^z \alpha(z) dz\right] - 1 \right\} = 2 \int_{z_0}^z S(z) dz. \quad (4)$$

选定一个高度  $z_c$ , 假设该高度处得到大气气溶胶消光系数  $\alpha_i(z_c)$  已知,激光雷达比设为常数,代入 Fernald 方法,反演各高度处的大气气溶胶消光系数,再利用雷达信号求出方程右侧值,即:

$$\frac{P(z_c)z_c^2}{\alpha_i(z_c)} \left\{ \exp\left[2 \int_{z_0}^{z_c} \alpha_i(z) dz\right] - 1 \right\} - 2 \int_{z_0}^{z_c} P(z)z^2 dz = 0, \quad (5)$$

式中  $\alpha_i(z)$  为假设的标定点处大气气溶胶消光系数值。假设一个  $\alpha_i(z)$ , 利用 Fernald 法反演得到的各高度处的大气总消光系数,代入方程,若  $\alpha_i(z)$  正确,则方程等式成立。通过迭代,得到一个较为准确的包含标定值信息的大气总消光系数  $\alpha_i(z_c)$ 。将  $\alpha_i(z_c)$  减去大气分子消光系数  $\alpha_m(z_c)$ , 并除以大气气溶胶消光后向散射比  $S_1$  即可得到  $z_c$  处的气溶胶后向散射系数值,即标定值。

## 3 算法验证

利用该算法对一台可以探测对流层整层气溶胶结构的双波长米散射激光雷达(DWL)<sup>[13,14]</sup> 探测的一组回波信号进行了反演,选取不同的标定点高度的取值范围,以获得不同的标定点。DWL 采用双视场结构,能够对流层下部和中上部气溶胶分别进行探测。利用该算法,在不同标定高度,对激光雷达信号进行反演。如图 1 所示,1、2、3、4 为 4 个不同的标定点,高度分别为 9.15、7.59、6.00、4.71 km,利用该算法确定的这 4 个点的大气气溶胶后向散射系数值作为标定值。由图可以看出,虽然选择了不同的高度进行标定,但利用本文提出的反演算法反演该组激光雷达信号发现,大气气溶胶后向散射系数垂直分布廓线同在对流层顶假定散射比为 1.01 确定标定值的反演结果(如图中实线所示)相吻合。

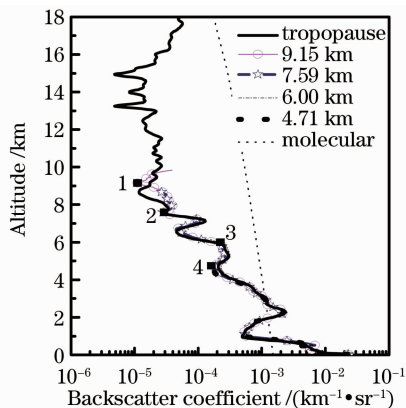


图 1 利用 MPL 散射比迭代法对一组信号在 4 个不同高度标定进行反演所得廓线

Fig. 1 Profiles derived from one lidar signal with MPL scattering ratio iteration method at four different altitudes

运用散射比迭代法对中国科学院安徽光学精密

机械研究所自行研制的 MPL<sup>[15]</sup> 数据进行处理。对 2009 年 3 月 7 日晚 19:30 MPL 探测的信号进行反演, 并利用相同时间探测对流层整层气溶胶结构的 DWL 在对流层顶附近确定标定点和标定值反演得到的结果进行对比验证。DWL 夜间探测距离大于 15 km, 能够在对流层顶附近寻找标定点, DWL 的反演结果受标定值影响很小, 因此 DWL 反演结果为大气气溶胶垂直分布的真实情况。利用 DWL 的反演结果对本文提出的自适应定标算法的反演结果

进行对比验证, 如图 2 所示。图 2(a) 中圈划线为假设弱气溶胶层高度处大气气溶胶散射比为 1.01 确定标定值反演得到的结果, 星画线为自适应算法确定标定值 $[\beta_a(\lambda, z_c) = 2.30 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}]$ 对应的散射比为 1.24 反演得到的结果。实线为 DWL 假设对流层顶散射比值为 1.01 确定标定值得到的结果。图 2(b) 给出两种方法确定标定值反演 MPL 信号结果的误差, 由图 2(b) 可以看出, 自适应算法的误差总体上小于 20%, 优于固定散射比确定标定值的方法。

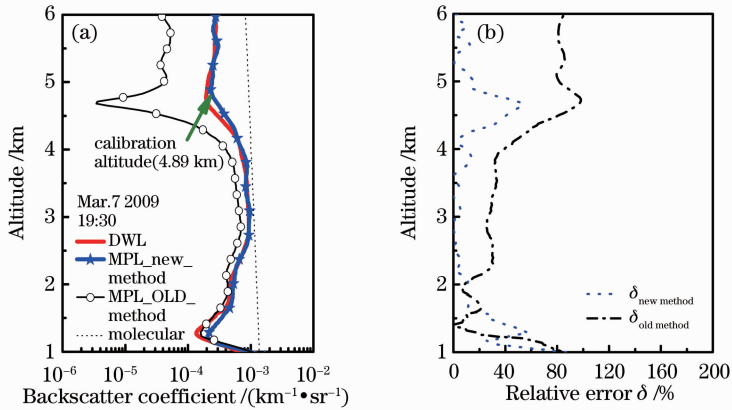


图 2 利用传统方法和本算法确定标定值反演 MPL 信号结果与 DWL 在对流层顶确定标定值反演结果对比。

(a) 反演结果; (b) 误差

Fig. 2 Comparison of MPL inversion results of two different methods with DWL results. (a) Inversion results; (b) errors

### 4 反演结果分析

图 3 给出了 MPL 反演结果同 DWL 信号反演结果以及同探空数据的对比情况。图 3(a) 为 MPL 的信号同 DWL 的探测信号, 由 MPL 信号(实线)可以看出该组信号在 5 km 之上探测信号出现较大起

伏, 有效探测高度较低, 不能在对流层顶附近选择标定点。运用自适应定标方法对信号进行反演, 标定点的选取范围为 4~5 km, 积分下限为 2 km, 散射比取值范围为 1~3, 利用这些数据对上述信号进行反演, 确定标定点高度为 4.89 km 处, 此高度上的大

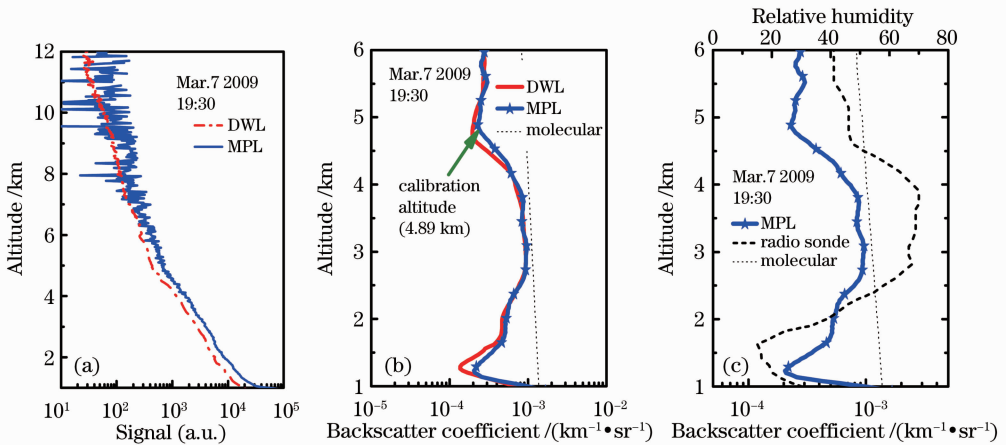


图 3 (a) MPL、DWL 两台激光雷达信号; (b) 利用微脉冲激光雷达散射比迭代法(MSRIM)反演 MPL 结果同 DWL 在对流层顶定标反演结果对比; (c) 相对湿度垂直分布廓线

Fig. 3 (a) Signal of MPL and DWL; (b) profiles retrieved from MPL signal MSRIM and DWL results; (c) profiles of relative humidity

气溶胶后向散射系数值为  $\beta_a(\lambda, z_c) = 2.30 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。将该高度上气溶胶后向散射系数值作为标定值,得到 MPL 信号的反演结果[如图 3(b)中星画线所示],将结果同 DWL 在对流层顶附近选择标定点反演得到的结果[如图 3(b)中实线]进行对比。当天 19:30 左右在相同观测场进行了探空气球的释放,将该时刻的探空数据中相对湿度结果列入图 3(c)中点划线,可以看出该 1.5~4.8 km 的气溶胶层相对湿度较大,且探空结果同激

光雷达探测的气溶胶结构层能够很好地吻合。

利用该算法对 MPL 当晚 18:30 至次日 6:00 共 25 组探测信号进行批处理反演,输入参数同 19:30 廓线相同,得到当晚气溶胶后向散射系数垂直分布时间演化图,如图 4 所示。由图可以看出在 3 月 7 日晚 22 点开始有出现一层气溶胶,随着时间的推移,该气溶胶层不断下沉,影响边界层内大气气溶胶浓度,对边界层内大气气溶胶结构产生影响。该时间演化图也能较好地显示出该方法的稳定性。

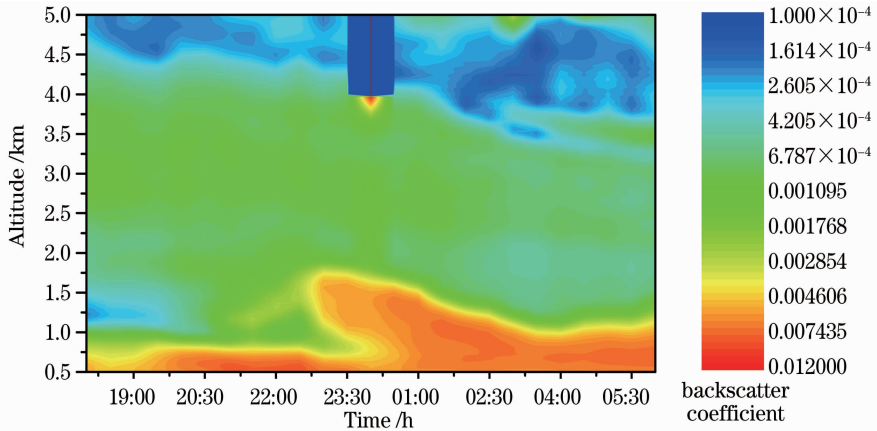


图 4 2009 年 3 月 7 日晚大气气溶胶后向散射系数垂直分布时间演化图(MPL 探测)

Fig. 4 Aerosol backscatter coefficients distribution with height and time on 7<sup>th</sup> March 2009 by MPL

图 5 给出当晚 23:00 至次日 8:00 每 3 h 一次的 MICAPS 地面填图(左上角为合肥站填图放大),由图 5 可以看出,3 月 8 日凌晨 2:00 合肥及周边地

区已经出现轻雾天气,该结果也验证了 MPL 反演结果的可靠性。

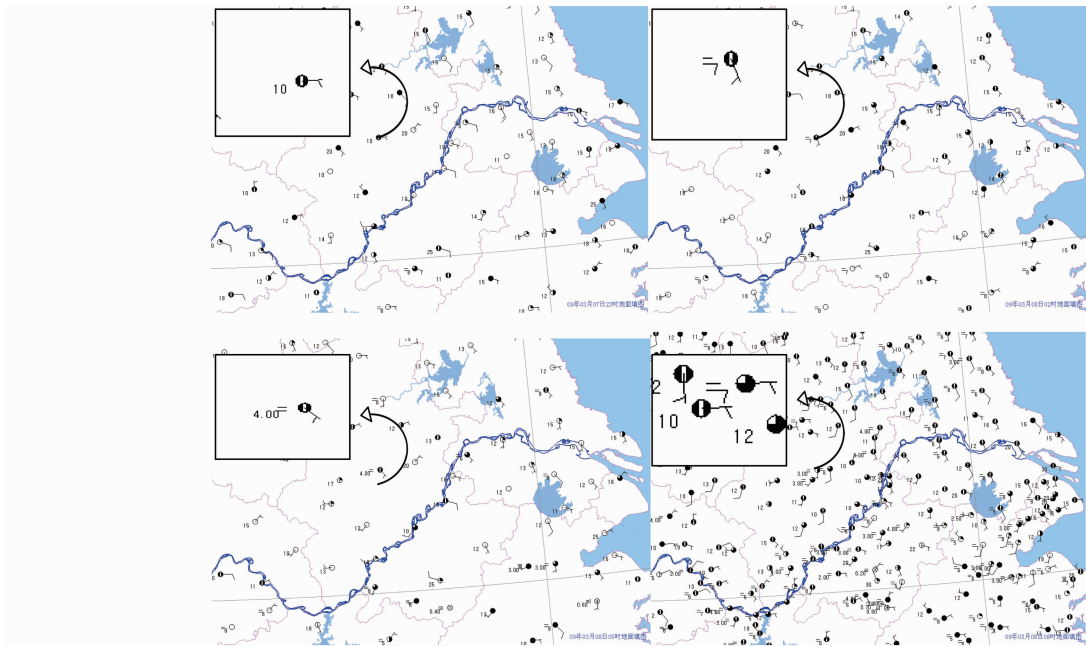


图 5 合肥地区 2009 年 3 月 7 日 23:00 至次日 8:00 每 3 h 的地面天气状况

Fig. 5 Surface meteorological conditions of each three hours in Hefei on 23:00 7<sup>th</sup> March 2009 to the following day at 8:00 am

## 5 结 论

利用一种新的激光雷达定标反演方法对微脉冲激光雷达数据进行处理,迭代求解标定值,验证了该方法对 MPL 的适用性。同时,DWL 的反演结果同样很好地验证了自适应特征在确定激光雷达定标算法中的作用。利用该方法批处理反演了 2009 年 3 月 7 日晚由 MPL 探测获得的信号,将该方法反演得到的结果同探测对流层气溶胶结构的 DWL 反演结果、探空结果进行了对比,结果证明该方法具有较好的稳定性,可以应用于微脉冲激光雷达信号的定量反演。

应用该方法对 MPL 的连续探测数据进行处理,可以对获得低层大气气溶胶光学性质垂直分布的时间演化情况,对大气气溶胶对雾霾天气情况的观测、定量分析具有重要意义。

## 参 考 文 献

- Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuanjia *et al.*. Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(6): 1093~1100  
刘东, 戚福第, 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
- Bo Guangyu, Xie Chenbo, Liu Dong *et al.*. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2526~2532  
伯广宇, 谢晨波, 刘东等. 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[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2526~2532
- Wang Shaolin, Xie Pinhua, Hu Shunxing *et al.*. Measurement of atmospheric boundary layer pollutants by mobile lidar in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(3): 562~568  
汪少林, 谢品华, 胡顺星等. 车载激光雷达对北京地区边界层污染监测研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 562~568
- Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1655~1658  
李学彬, 徐青山, 魏合理等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1655~1658
- 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
- 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
- Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi *et al.*. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 140~148  
周军, 岳古明, 戚福第等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 140~148
- Zongming Tao, Zeqing Zhang, Kee Yuan *et al.*. Retrieving aerosol back scattering coefficient for short range lidar using parameter selection at reference point [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(8): 732~734
- F. G. Fernald, B. M. Herman, J. A. Reagan. Determination of aerosol height distribution by lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3): 482~489
- J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- G. F. Frederrick. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- P. B. Russell, T. J. Swissler, M. P. McCormick. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(22): 3783~3797
- Yuan Lin, Liu Bo, Wang Bangxin *et al.*. Design of mobile 1064 nm Mie scattering lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1721~1725  
袁林, 刘博, 王邦新等. 车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达的研制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1721~1725
- Chi Ruli, Wu Decheng, Liu Bo *et al.*. Dual-wavelength Mie lidar observation of tropospheric aerosols [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(6): 1468~1472  
迟如利, 吴德成, 刘博等. 双波长米氏散射激光雷达探测对流层气溶胶消光特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(6): 1468~1472
- Xu Chidong, Ji Yufeng. Research and application of MPL-A1/T micro pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(5): 337~343  
徐赤东, 纪玉峰. MPL-A1/T 型微脉冲激光雷达的研制与应用[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(5): 337~343