

文章编号: 0253-2239(2010)06-1531-06

低层大气中确定气溶胶后向散射系数边界值的新方法

陈 涛 吴德成 刘 博 曹开法 王珍珠 伯广宇 袁 林 周 军

(中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 在反演大气气溶胶后向散射系数时,为了消除激光雷达系统常数,通常在对流层顶附近假设一个气溶胶后向散射系数的边界值。但当激光雷达的有效探测高度达不到对流层顶时,边界值的确定变得十分困难。从米氏散射激光雷达方程出发,得到了边界值与激光雷达距离平方校正回波信号之间的等式关系,并将该关系作为判据,利用迭代法在低层大气中找到一个比较准确的后向散射系数的边界值。将该方法应用于实际激光雷达回波信号反演中,得到低层大气中气溶胶后向散射系数廓线,并与在对流层顶选取边界值反演得到气溶胶后向散射系数廓线进行比较。结果表明,利用提出的方法在低层大气中确定的后向散射系数边界值,可以较好地反演出低层大气中气溶胶后向散射系数廓线。

关键词 大气光学;激光雷达;后向散射系数;边界值

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1531

A New Method for Determining Aerosol Backscatter Coefficient Boundary Value in the Lower Troposphere

Chen Tao Wu Decheng Liu Bo Cao Kaifa Wang Zhenzhu
Bo Guangyu Yuan Lin Zhou Jun

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract In the procedure of retrieving aerosol backscatter coefficient, the boundary value of aerosol backscatter coefficient is always assumed around the troposphere to eliminate the lidar constant. When the range of the lidar detection cannot reach the tropopause, it is very difficult to determine the boundary value. A relationship between boundary value and range square corrected signal is derived from elastic scattering lidar equation. Using this relationship as a criterion, a boundary value can be determined in the lower troposphere with iteration algorithm. A profile of aerosol backscatter coefficient, which is retrieved with the boundary value determined using a new method introduced in this paper, is compared with the one retrieved with the boundary value assumed around the troposphere. The comparison shows that these two profiles seem to be consistent with each other well. The profile of aerosol backscatter coefficient can be retrieved with the boundary value determined using the new method in the lower troposphere.

Key words atmosphere optics; lidar; backscatter coefficient; boundary value

1 引 言

大气气溶胶是大气中的一种重要成分。由于它对太阳辐射的散射、吸收以及对云和降水的影响,大

气气溶胶成为影响全球气候变化的一个重要因子。目前,大气气溶胶已经成为气候和环境等领域的一个研究热点^[1~3]。激光雷达有很高的时空分辨率以

收稿日期: 2009-05-06; **收到修改稿日期**: 2009-09-27

基金项目: 国家 973 计划(2006CB403702)资助课题。

作者简介: 陈 涛(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达技术和大气遥感探测等方面的研究。

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

导师简介: 周 军(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光雷达技术和激光大气遥感探测等方面的研究。

E-mail: jzhou@aiofm.ac.cn

及合适的探测波长,使其成为了探测大气气溶胶的一个非常重要的手段。但是在使用 Fernald 方法对激光雷达数据进行大气气溶胶后向散射系数反演时,需要提供一个合适的边界值。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,并假设标定点上的气溶胶的散射比为某一定值^[3,4],即边界值。由于对流层顶附近的气溶胶一般含量很低、随时间的变化很小,此时设定的边界值对气溶胶后向散射系数的反演影响很小。但有时受激光雷达自身探测能力的限制以及云的影响,激光雷达有效探测范围达不到对流层顶。这时,标定高度与边界值的合理选取成为正确反演气溶胶后向散射系数的关键问题^[5]。为解决此问题,传统的方法有固定散射比法和斜率法。固定散射比法,即在某一高度假设气溶胶后向散射系数值为一定值。但是由于受地面气溶胶源的影响,低层大气中气溶胶含量不同时刻间差异很大。斜率法是利用拟合的方法确定边界值^[6],这种方法要求在拟合的区域内气溶胶均匀分布,该条件通常难以满足。1993 年 Kovalev^[7]提出了一种迭代算法,该算法利用气溶胶和空气分子的消光系数定义一个信号校正因子通过迭代对信号进行校正,得到气溶胶的消光系数。该算法利用透射率及各高度上消光系数不能小于零的前提,通过迭代修正校正因子以及透射率,确定边界条件。

本文结合激光雷达方程及其解,整理得到边界值、大气透射率和回波信号之间的关系,以此作为判断边界值是否准确的判据。利用该判据,在一定的范围内选择一个符合条件的值即为反演所需的边界值。该方法能够针对不同的天气状况自动选择不同的最佳气溶胶散射比,并且对气溶胶的空间分布没有特别苛刻的要求。利用激光雷达在不同天气条件下实测的数据验证了该方法的可行性。

2 Fernald 方法

激光雷达垂直发射的激光光束通过大气时,由于受到大气气溶胶及空气分子的散射和消光作用,激光雷达接收到高度 z 处大气后向散射回波信号 $P(\lambda, z)$ 为^[8,9]

$$P(\lambda, z) = C_1 \frac{\beta(\lambda, z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z \sigma(\lambda, z') dz'\right], \quad (1)$$

式中 C_1 是仅与系统有关的量; $\beta(\lambda, z) = \beta_a(\lambda, z) + \beta_m(\lambda, z)$, 式中 $\beta_a(\lambda, z)$ 和 $\beta_m(\lambda, z)$ 分别是高度 z 处的大气气溶胶和空气分子的后向散射系数; $\sigma(\lambda, z) = \sigma_a(\lambda, z) + \sigma_m(\lambda, z)$, 式中 $\sigma_a(\lambda, z)$ 和 $\sigma_m(\lambda, z)$ 分别是高度 z 处的大气气溶胶和空气分子的消光系数。

如果事先已知某一高度 z_c 处(标定高度)气溶胶和空气分子后向散射系数(边界值), Fernald 给出 z_c 以下各高度的气溶胶为后向散射系数(后向积分)^[10]

$$\beta_a(\lambda, z) = -\beta_m(\lambda, z) + \frac{P(\lambda, z) z^2 \exp\left[2(S_a - S_m) \int_z^{z_c} \beta_m(\lambda, z') dz'\right]}{[P(\lambda, z_c) z_c^2] / [\beta_a(\lambda, z_c) + \beta_m(\lambda, z_c)] + 2S_a \int_z^{z_c} P(\lambda, z) z^2 \exp\left[2(S_a - S_m) \int_z^{z_c} \beta_m(\lambda, z') dz'\right] dz}. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,若要从米氏散射激光雷达测量的回波信号 $P(\lambda, z)$ 中得到大气气溶胶的后向散射系数 $\beta_a(\lambda, z)$, 必须知道标定高度 z_c 、边界值 $\beta_a(\lambda, z_c)$ 、 $\beta_m(\lambda, z)$ 、 S_a 和 S_m 5 个参数。其中 $\beta_m(\lambda, z)$ 可由大气分子消光模式计算得到; 空气分子消光后向散射比 $S_m = \sigma_m(\lambda, z) / \beta_m(\lambda, z) = 8\pi/3$; 大气气溶胶消光后向散射比 $S_a = \sigma_a(\lambda, z) / \beta_a(\lambda, z)$, 它随着大气气溶胶浓度、尺度谱分布和化学成分的变化而变化,这里假设其为常数,对于 532 nm 波长, S_a 一般设为常数并取值为 50 Sr。参数 z_c 和 $\beta_a(\lambda, z_c)$ 的确定方法将在下节给出。

3 标定高度与边界值的确定方法

3.1 理论推导

在激光雷达对流层气溶胶探测研究中,标定高度 z_c 通常是选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度。而这个高度上 $P(\lambda, z) z^2 / \beta_m(\lambda, z)$ 应最小,这一高度通常在对流层顶附近^[3]。对于探测高度较低的情况,虽然无法在对流层顶附近选择标定点,但仍然可以在一定的探测范围内寻找到一个 $P(\lambda, z) z^2 / \beta_m(\lambda, z)$ 值最小的高度,将此高度作为标定点的所在高度 z_c 。

在确定边界值时,考虑激光雷达进行低空大气

探测时,由于探测范围内气溶胶浓度相对都较大,可假设 $\beta(\lambda, z)$ 与 $\sigma(\lambda, z)$ 之间存在如下关系^[9]

$$\beta(z) = C_2 \sigma(z)^k, \quad (3)$$

式中 C_2 和 k 均为常数, k 值设为 1。

将上式代入雷达方程,则(1)式可改写为

$$P(z) = C_1 C_2 T_0^2 \frac{\sigma(z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_{z_0}^z \sigma(z) dz\right], \quad (4)$$

式中 z_0 为大气后向散射回波信号完全进入视场的最小距离, $T_0^2 = \exp\left[-2 \int_0^{z_0} \sigma(z) dz\right]$ 。

对上式进行移项并整理,可以得到如下方程

$$C_1 C_2 T_0^2 = \frac{P(z) z^2}{\sigma(z)} \exp\left[2 \int_{z_0}^z \sigma(z) dz\right] = \frac{P(z) z^2}{\sigma(z)} \left[1 + 2\tau + \frac{(2\tau)^2}{2!} + \dots\right], \quad (5)$$

式中 $\tau = \int_{z_0}^z \sigma(z) dz$ 。

另外(4)式的解可表示为^[7,8]

$$\sigma(z) = \frac{S(z)}{C_1 C_2 T_0^2 - 2I(z_0, z)}, \quad (6)$$

式中

$$S(z) = P(z) z^2, \quad (7)$$

$$I(z_0, z) = \int_{z_0}^z S(z) dz, \quad (8)$$

对(6)式整理可得

$$C_1 C_2 T_0^2 = \frac{P(z) z^2}{\sigma(z)} + 2 \int_{z_0}^z S(z) dz. \quad (9)$$

比较(5)式和(9)式可以看出,两式的左边部分为同一个量,将两式相减并整理即可得

$$\frac{P(z) z^2}{\sigma(z)} \left[2\tau + \frac{(2\tau)^2}{2!} + \dots\right] = 2 \int_{z_0}^z S(z) dz. \quad (10)$$

假设一个边界值,利用 Fernald 方法反演气溶胶后向散射系数,雷达比设为常数,求出大气气溶胶消光系数,利用该消光系数及大气分子消光系数计算出 τ 值,代入(10)式左侧,再利用雷达信号求出方程右侧值。上述可以表达为如下方程式

$$\frac{P(z_c) z_c^2}{\sigma(z_c)} \left\{ 2\tau[\sigma(z_c)] + \frac{\{2\tau[\sigma(z_c)]\}^2}{2!} + \dots \right\} = 2 \int_{z_0}^{z_c} P(z) z^2 dz. \quad (11)$$

由(11)式的结构可以看出,方程左侧是 $\sigma(z_c)$ 的函数,右侧是回波信号的定积分值。通过迭代的方法,

寻找到一个合适的 $\sigma(z_c)$ 使(11)式成立,此 $\sigma(z_c)$ 对应 z_c 处大气总的消光。将 $\sigma(z_c)$ 减去大气分子消光系数 $\sigma_m(\lambda, z_c)$, 并除以大气气溶胶消光后向散射比 S_a , 即可得到 z_c 处的气溶胶后向散射系数值,即边界值。

3.2 定标算法

在分析激光雷达大气气溶胶数据时,通常会引入散射比 $R(\lambda, z)$, 散射比定义为^[4]

$$R(\lambda, z) = \frac{\beta(\lambda, z)}{\beta_m(\lambda, z)} = 1 + \frac{\beta_a(\lambda, z)}{\beta_m(\lambda, z)}, \quad (12)$$

为简化算法,利用散射比定义及雷达比来确定(11)式中的 $\sigma(z_c)$ 。

以激光雷达距离校正回波信号 $z_0 \sim z_c$ 的积分值和该范围内的大气透射率作为判断条件,可以利用穷举法反复迭代来确定一个合适的 $\sigma(z_c)$ 。在实际编程时,通过改变散射比 R 来调整 $\sigma(z_c)$ 的值。散射比的取值范围为 1~3, 取值步长为 0.01。对应每一个散射比,按照散射比的定义计算出大气气溶胶后向散射系数边界值,然后利用 Fernald 方法求出一条气溶胶后向散射系数廓线,由雷达比(对流层大气气溶胶在 532 nm 上的雷达比一般取为 50 Sr)定义计算出气溶胶的消光系数 $\sigma_a(\lambda, z)$, 再将大气分子消光系数 $\sigma_m(\lambda, z)$ 与 $\sigma_a(\lambda, z)$ 求和得到大气总消光系数 $\sigma(\lambda, z)$, 其中 $\sigma_m(\lambda, z)$ 由模式计算。对 $\sigma(\lambda, z)$ 在 $z_0 \sim z_c$ 范围内积分得到大气总光学厚度 τ , 代入(11)式左侧,仅取括号内的前两项,记为 A 。同时在 $z_0 \sim z_c$ 范围内对距离校正回波信号积分,即(11)式右侧值,记为 B 。判断该散射比对应的后向散射系数值是否为标定点处的边界值的判据如下

$$\frac{|A - B|}{B} \leq x\%. \quad (13)$$

如果 A, B 满足(13)式所示判据,则迭代停止,否则,选取下一个散射比。重复上述过程,直到找到一个合适的边界值。式中的 x 值应能够进行自动调整,使该算法得到的边界值误差尽可能小且能够得到合适的结果。该算法称为散射比迭代法(BRIM),其具体反演步骤流程如图 1 所示。

4 反演结果及对比验证

采用散射比迭代法获得的边界值及 Fernald 反演方法,对中国科学院安徽光机所自行研制车载激光雷达(AML-2)^[11] 回波信号进行了反演,同时利用固定散射比法确定的边界值及 Fernald 反演方法对上述信号进行反演。将两种反演结果与探测对流层

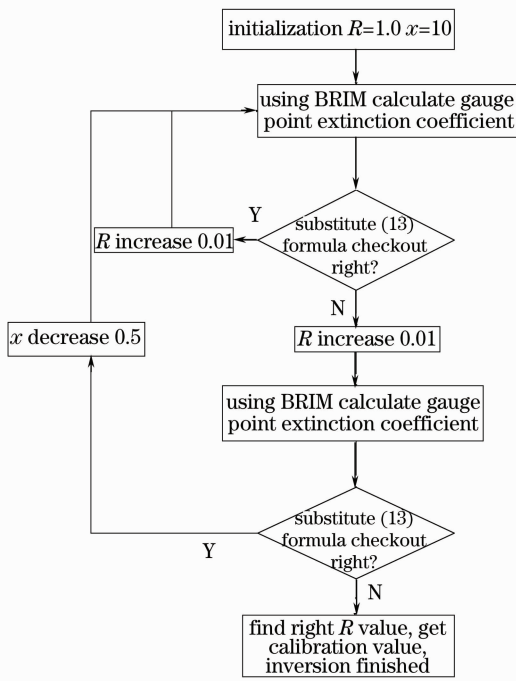


图 1 散射比迭代法流程图

Fig. 1 Flow chart of backscatter ratio iterative method (BRIM)

的双波长米氏散射激光雷达 (DWL)^[12] 反演所得的结果进行了比较。AML-2 主要应用于探测低空大气污染情况, 可对 SO_2 , N_2 , O_3 及气溶胶进行探测, 其中对气溶胶的探测采用 Nd:YAG 激光器的二次谐波 532 nm 作为探测波长, 得到气溶胶在 532 nm 上的后向散射系数, 532 nm 的输出能量大于等于 30 mJ, 探测高度为 0.4~5 km, 探测高度较低。而 DWL 采用双视场结构, 能够对对流层下部和中上部气溶胶分别进行探测, 采用 Nd:YAG 激光器的基

频及二次谐波作为探测波长, 获得气溶胶在 532 nm 和 1064 nm 上的米氏散射回波, 反演得到气溶胶在两波长的后向散射系数, 其中 532 nm 上的输出能量大于等于 150 mJ。探测距离夜晚大于 15 km, 可以在对流层顶附近寻找标定点, 且 Fernald 后向积分是收敛的, 所以在低空 DWL 的反演结果是可靠的。因此可以利用 DWL 的反演结果对散射比迭代算法的反演结果进行对比验证。

反演数据为 2008 年 11 月 13 日与 11 月 19 日的 AML-2 532 nm 米氏散射回波信号。13 日早晨有大雾出现, 气溶胶浓度相对较大, 而 19 日天气晴朗, 气溶胶浓度相对较小。分别使用散射比迭代法和固定散射比法得到的边界值及 Fernald 反演方法对这两天 AML-2 的信号进行处理, 将所得结果与 DWL 在相同探测条件下得到的反演结果进行对比, 对比结果如图 2 和图 3 所示。

图 2(a) 所示 11 月 19 日利用上述两种方法反演 AML-2 信号得到的结果和相同探测条件下 DWL 的反演结果。其中的 β 为双波长米氏散射 DWL 在标定点高度为 12.84 km 处, 令散射比 R 为 1.01 确定边界值, 利用 Fernald 方法反演得到的后向散射系数廓线。 β_{MM} 为采用固定散射比法反演 AML-2 回波信号得到的结果。 β_{BRIM} 为采用散射比迭代法确定边界值得到的反演结果。两种方法标定高度均为 3.87 km。由散射比迭代法确定的标定点处的散射比为 1.08, 其中判据中的 x 为 5。图 2(b) 所示给出散射比迭代法确定边界值的反演结果同 DWL 反演结果的相对误差。由 δ_{BRIM} 可以看出利用散射比迭代法确定边界值进行反演得到的结果能够满足激光雷达信号数据反演的需求。

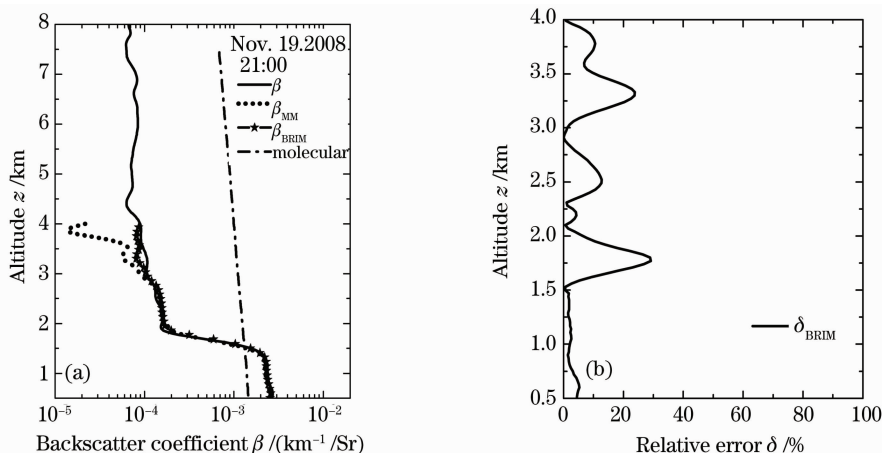
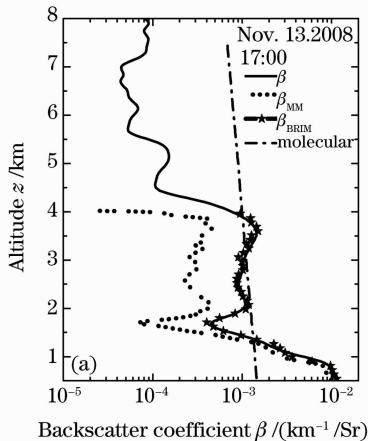


图 2 2008 年 11 月 19 日利用两种方法确定边界值对 AML-2 信号反演结果与 DWL 反演结果的对比情况
Fig. 2 Comparison of AML-2 inversion results of two methods with DWL inversion result (Nov. 19, 2008)

图 3(a)所示 11 月 13 日利用上述两种方法反演 AML-2 信号得到的结果,并给出相同探测条件下 DWL 的反演结果。其中的 β 为 DWL 的反演结果,标定高度为 10.56 km。 β_{MM} 为采用固定散射比法确定边界值反演 AML-2 信号得到结果。 β_{BRIM} 为采用散射比迭代法确定的边界值反演得到的结果。两种方法标定高度均为 3.99 km。散射比迭代



法确定的标定点处的散射比值为 1.71,反演时判据中的 x 为 1。图 3(b)所示上述两反演结果同 β_{DWL} 的相对误差。虽然当天在整个有效探测范围内气溶胶浓度相对都比较大,但由于采用散射比迭代法确定了一个相对误差较小的边界值,所以反演得到的结果能够基本保证探测的误差要求。

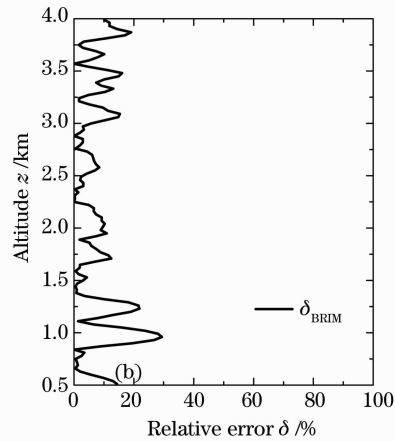


图 3 2008 年 11 月 13 日利用两种方法确定边界值对 AML-2 信号反演的结果与 DWL 反演结果的对比情况
Fig. 3 Comparison of AML-2 inversion results of two methods with DWL inversion result(Nov. 13,2008)

对比图 2 和图 3,由于低层大气气溶胶浓度较大,且不同天气情况间气溶胶浓度差异显著,所以选择一个相对干净的高度设定一个固定的散射比去确定边界值会产生很大误差。而散射比迭代法能够根据激光雷达的回波信号来寻找一个合适的边界值,运用此边界值进行反演,得到的结果具有较高的准确性。

5 结 论

介绍了一种新的激光雷达低层大气探测 Fernald 反演定标方法(散射比迭代法)。该方法寻找到一个弱气溶胶层,利用信号与边界值之间存在的一个等式关系,通过穷举法获得该高度处气溶胶散射比值,并以此来确定边界值。该方法确定的后向散射系数边界值误差较小,可以解决因探测高度低而导致的边界值确定困难的问题。利用该定标方法获得了边界值并利用 Fernald 方法反演 AML-2 米氏散射回波信号。将反演结果与 DWL 的反演结果进行了对比,吻合良好。结果表明,利用该后向散射系数边界值算法和 Fernald 反演方法可以较准确地对低空大气的激光雷达回波信号进行反演,获得低空大气气溶胶较为准确的空间分布信息和光学

特性。

参 考 文 献

- 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
- Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1573
韩道文, 刘文清, 刘建国 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~1573
- Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi *et al.*. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese J. 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
- 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
- Liu Houtong, Ge Zhanqi, Wang Zhenzhu *et al.*. Extinct ion coefficient inversion of airborne lidar detecting in low-altitude by fernald iterative backward integration method (FIBIM) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1837~1843
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): 1837~1843
- G. J. Kunz, G. D. Leeuw. Inversion of signals with the slope method [J]. *J. Opt. Soci. Am.*, 1993, **32**(18): 3249~3256
- V. A. Kovalev. Lidar measurement of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction

- ratios [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 6053~6065
- 8 F. G. Fernald, B. M. Herman, J. A. Reagan. Determination of aerosol height distribution by lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(4): 482~489
- 9 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 10 G. F. Frederrick. Analysis of atmospheric lidar observations; some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652
- 11 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
- 12 Zhong Zhiqing, Liu Bo, Fan Aiyuan *et al.*. Two-wavelength Mie lidar with two receivers [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(3): 173~178
- 钟志庆, 刘 博, 范爱媛等. 双波长双视场米散射激光雷达[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(3): 173~178