

探究影响南京地区大气气溶胶光学特性反演的因素

宋秀瑜, 曹念文, 杨思鹏

南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044

摘要 对南京地区大气气溶胶的光学特性进行了反演, 讨论了影响大气气溶胶消光系数反演准确度的不同因素。采用不同的方法对信号进行去背景处理, 找出合适的去噪方法; 利用五点三次平滑、小波去噪、十一平滑等方法对去噪后的信号进行再处理, 找出可以得到准确反演结果的方法。分析了 Klett 方法中的后向消光对数比与参考高度处的消光系数对反演结果的影响, 分别对 k 的取值范围为 $0.67 \sim 1.0$ 、 σ_m 的取值在 $1 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ 附近的反演结果进行了分析, 在 Fernald 方法中分析激光雷达比的取值(范围为 $20 \sim 70$)对反演结果的影响。对 Klett 与 Fernald 两种方法的计算结果进行了对比, 发现在大气气溶胶含量低的区域, 两种方法反演结果有差别, 而在大气气溶胶含量较高区域, 两种方法反演结果几乎相同。

关键词 大气光学; 激光雷达; 大气气溶胶; 反演; 消光系数

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.040101

Influence Factors on Atmospheric Aerosol Optical Property Inversion in Nanjing

Song Xiuyu, Cao Nianwen, Yang Sipeng

Key Laboratory of Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract The optical property of atmospheric aerosol in Nangjing is inversed, and the different factors which can influence the inversion accuracy of extinction coefficient of atmospheric aerosol are studied. The de-noising processing for signal is carried out by different methods, and the suitable de-noising method is found. The reprocessing for de-noised signal is carried out with five-point triple smoothing, wavelet de-noising and eleven-point smoothing respectively, and the method which can obtain accurate inversion result is chosen. The effects of logarithmic ratio of backscatter extinction and extinction coefficient at the reference height on the inversion result of Klett method are analyzed. The inversion results when k ranges from 0.67 to 1.0 and σ_m is about $1 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ are analyzed. The influence of the lidar ratio on the inversion result of Fernald method is analyzed when the lidar ratio ranges from 20 to 70. The results of Klett method are compared with that of Fernald method. It is found that in the region with low atmospheric aerosol content, the results of the two methods are different, but the results of the two methods are almost same in the region with high aerosol content.

Key words atmospheric optics; lidar; atmospheric aerosol; inversion; extinction coefficient

OCIS codes 010.1100; 280.3640; 280.1100

1 引言

大气气溶胶是由悬浮在大气中的多种固体、液体微粒共同组成的多相体系^[1], 影响大气环境中的许多物理化学过程。通常情况下, 大气气溶胶粒子的直径范围为 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 。大气气溶胶粒子可以在大气中停留至

收稿日期: 2016-10-20; **收到修改稿日期:** 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(41375044, 41175033)

作者简介: 宋秀瑜(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: 1148814266@qq.com

导师简介: 曹念文(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光大气探测方面的研究。

E-mail: nwcao@nuist.edu.cn(通信联系人)

少几个小时甚至几天,使大气的组成成分、结构等发生变化,从而破坏了原有的正常生态系统。虽然,地球大气系统中的大气气溶胶含量很低,但由于其分布在整个大气层中,影响着气候效应,进而影响人们的身体健康,因此通过探测和研究大气气溶胶来改善大气环境具有重要意义,国内外很多研究人员对此进行了相关研究^[2-5]。

与卫星相比,激光雷达具有更高的时空分辨率,因此常用作大气探测。张宏宇等^[6]认为应用激光雷达检测系统对外场远距离固定目标进行检测时,利用小波去噪法可以在很大程度上改善信噪比。Klett方法可应用于求解单波长激光雷达方程,在求解激光雷达方程时,认为后向散射系数 $\beta(r)$ 和消光系数 $\sigma(r)$ 满足 $\beta(r) = B\sigma^k(r)$,其中 r 为高度, k 为后向消光对数比, k 和 B 均为常数, k 的取值范围为 $0.67 \leq k \leq 1.0$ ^[7]。由于一个激光雷达探测方程中存在两个未知量,即大气气溶胶的消光系数和后向散射系数,定量反演这两个量必须有其他信息作为辅助^[8-12]。若没有辅助信息,使用激光雷达观测数据精确反演大气气溶胶的垂直分布时,大气气溶胶的消光系数和后向散射系数的比值(即消光后向散射比,也称为激光雷达比)是一个必需的参数。激光雷达比是采用 Fernald 方法求解米氏散射激光雷达方程时需要设置的关键未知参数,从研究大气气溶胶光学厚度的敏感性实验中发现,激光雷达比越大,大气气溶胶光学厚度也越大^[13],因此激光雷达比对反演结果有着重要影响^[14-15]。本文选取了位于南京信息工程大学内的拉曼-瑞利-米氏三通道激光雷达(RRML)的米通道观测数据,分析了影响南京地区大气气溶胶光学特性反演的因素。

2 原理

2.1 激光雷达系统

观测地点位于南京信息工程大学内的中国气象局综合观测实验基地(东经 118.7°,北纬 32.2°)。该观测地点位于南京浦口区东北部,距离南京市市区 10 km 左右。该观测地点北面是浦口区盘城镇,南面是龙王山,往东 3 km 左右为浦口区最大的工业园区。

观测仪器采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 RRML,其结构示意图如图 1 所示。整个系统放置在一个水平工作台上,实验室内保持恒温。光学发射单元采用 Continuum 公司生产的 Surelite II 型激光器,波长为 532 nm,脉冲能量为 200 mJ,重复频率为 20 Hz。激光器发出的激光经反射镜的反射后,垂直向上输入大气。利用 Hamamatsu 公司生产的 H5783 型光电倍增管(PMT)检测 532 nm 通道信号,得到峰值响应波长为 500 nm,光敏面直径为 8 mm。该 PMT 内置高压模块,适用于大气气溶胶层强回波信号的检测^[16]。信号采集选用 12 位模/数(A/D)数据采集卡(PCI29812 型,凌华公司)。通过将 532 nm 通道米散射回波信号和瑞利散射回波信号相结合,可以反演 1~15 km 大气气溶胶的光学特性参数。

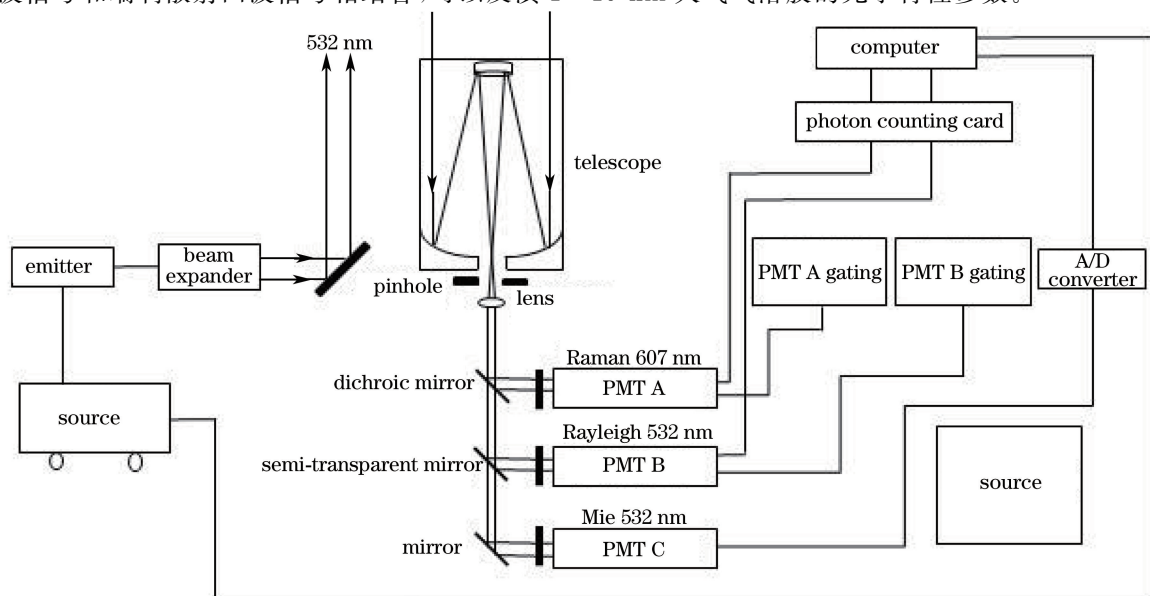


图 1 RRML 结构示意图

Fig. 1 Diagram of RRML structure

2.2 消光系数和光学厚度

2.2.1 Klett 消光系数的反演算法

一次散射的激光雷达方程^[17]为

$$P(r) = P_0(c\tau)/2A \frac{\beta(r)}{r^2} \exp\left[-2\int_0^r \sigma(r')dr'\right], \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 为高度 r 处的大气后向散射回波功率; $P_0(c\tau)$ 为发射激光束的功率; c 为光速, τ 为一个脉冲持续时间, $c\tau/2$ 为一个脉冲时间里激光传输的距离; A 为接收望远镜的有效接收面积; $\beta(r)$ 、 $\sigma(r)$ 分别为高度 r 处的大气后向散射系数和消光系数。

根据 Klett 假定的大气消光系数和后向散射系数之间存在的关系 $\beta(r) = B\sigma^k(r)$, 得到一个反演消光系数的稳定解为

$$\sigma(r) = \frac{\exp[(S_0 - S_m)/k]}{\sigma_m^{-1} + (2/k) \int_r^{r_m} \exp[(S_0 - S_m)/k] dr'}, \quad (2)$$

式中 S_m 为参考高度处的距离修正信号的对数, S_0 为距离修正信号的对数, k 为后向消光对数比, r_m 为参考高度, σ_m 为参考高度处的消光系数。

2.2.2 Fernald 消光系数的反演算法

利用 Klett 方法计算出的消光系数是大气分子和大气气溶胶的消光系数之和, 而 Fernald 提出的消光系数的反演算法则将大气分子和大气气溶胶分开考虑, 以求得更加精确的反演消光系数。激光雷达方程可表示为

$$P(r) = P_0 Cr^{-2} [\beta_a(r) + \beta_m(r)] T_a^2(r) T_m^2(r), \quad (3)$$

式中 $\beta_a(r)$ 和 $\beta_m(r)$ 分别为高度为 r 处的大气气溶胶粒子和大气分子的后向散射系数, $T_a(r)$ 为高度为 r 处的大气气溶胶的透射率, $T_m(r)$ 为高度为 r 处的大气分子的透射率, 且 $T_a^2(r)T_m^2(r) = \exp\left[-2\int_0^r [\sigma_a(r) + \sigma_m(r)] dr\right]$ 表示激光的双程透射率, 其中 $\sigma_a(r)$ 和 $\sigma_m(r)$ 分别为高度为 r 处的大气气溶胶粒子和大气分子的消光系数。为方便求解, 引入大气气溶胶的消光后向散射比 $S_a = \sigma_a(r)/\beta_a(r)$ 。根据瑞利散射公式, 可以确定大气分子的消光后向散射比 $S_m = \sigma_m(r)/\beta_m(r) = 8\pi/3$, 则 $\beta_a(r)$ 可表示为

$$\beta_a(r) = \frac{P(r) \exp\left[-2(S_a - S_m) \int_{r_0}^r \sigma_m(r) dr\right]}{[P(r_0)/\beta_a(r_0) + \beta_m(r_0)] - 2S_a \int_{r_0}^r P(r) \exp\left[-2(S_a - S_m) \int_{r_0}^r \sigma_m(r') dr'\right] dr} - \beta_m(r), \quad (4)$$

式中 r_0 为参考高度。可以看出, 只要确定了 r_0 处的大气气溶胶的消光系数和大气分子的消光系数, 便可得到 r_0 处的大气气溶胶后向散射系数。大气分子的消光系数可以根据 1976 年美国标准大气模型得到, 通过后向积分计算得到高度大于 r_0 处的大气气溶胶消光系数为

$$\sigma_a(r) = \frac{P(r) \exp\left[-2(S_a/S_m - 1) \int_{r_0}^r \sigma_m(r) dr\right]}{P(r_0) \left/ \left\{ \sigma_a(r_0) + (S_a/S_m) \sigma_m(r_0) - 2 \int_{r_0}^r P(r) \exp\left[-2(S_a/S_m - 1) \int_{r_0}^r \sigma_m(r') dr'\right] dr \right\} \right.} - (S_a/S_m) \sigma_m(r). \quad (5)$$

通过前向积分得到高度小于 r_0 处的大气气溶胶的消光系数为

$$\sigma_a(r) = \frac{P(r) \exp\left[-2(S_a/S_m - 1) \int_r^{r_0} \sigma_m(r) dr\right]}{P(r_0) \left/ \left\{ \sigma_1(r_0) + (S_a/S_m) \sigma_m(r_0) + 2 \int_r^{r_0} P(r) \exp\left[2(S_a/S_m - 1) \int_r^{r_0} \sigma_m(r') dr'\right] dr \right\} \right.}$$

$$(S_a/S_m)\sigma_m(r)。 \quad (6)$$

2.2.3 大气气溶胶光学厚度算法

大气气溶胶光学厚度是描述大气气溶胶对光的衰减作用的一个物理量,可通过对消光系数在 z 方向求定积分获得,可表示为

$$\tau = \int_0^z \sigma(z) dz。 \quad (7)$$

考虑到高度为 9 km 以上的大气气溶胶对消光的贡献几乎可以忽略不计,因此光学厚度可通过对激光雷达的消光系数在 0~9 km 范围内积分得到。

3 影响计算准确度的因素

3.1 去 噪

3.1.1 去背景

RRML 采集到的垂直通道的信号较弱,激光能量的衰减速度随着高度的增加而增大,且高空的背景噪声比较大,因此进行消光系数反演之前必须先去背景。高度为 10 km 以上的大气气溶胶含量极低,可以将其看作大气背景^[18],具体方法有两种:1) 将在高度为 10 km 以上采集的信号的最小值作为背景;2) 将在高度为 10 km 以上采集的信号的平均值作为背景,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,背景取采集信号的平均值后得到的信号更加接近原始信号,因而将在高度为 10 km 以上采集信号的平均值作为背景更好。

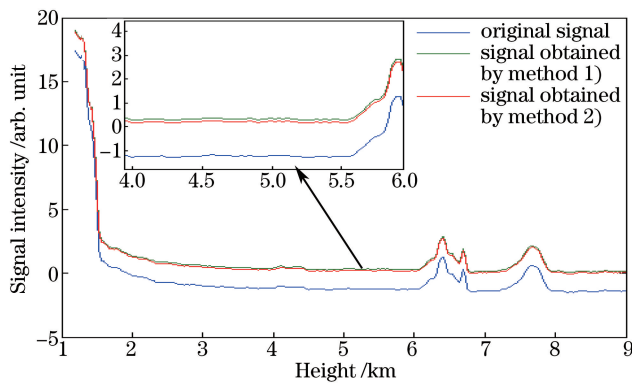


图 2 背景去噪效果对比

Fig. 2 Comparison of background de-noising effect

3.1.2 数据再处理

由于数据记录是通过光子计数卡采集光子数,因此采集数据时信号本身可能出现波动,这种细微的波动也是信号的背景噪声。为了使信号处理结果更可信,在去背景后还要进行数据再处理,方法包括五点三次平滑、小波去噪和十一点平滑。五点三次平滑是将相邻的 5 点数据进行拟合,得到一条 3 次曲线,再将 3 次曲线上相应位置的值作为滤波结果。小波去噪是先根据信号频率的不同将信号分解为 n 层(以 $n=4$ 为例),再将需要处理的原始信号分为高频和低频两种信号,可表示为

$$S = a_4 + d_1 + d_2 + d_3 + d_4, \quad (8)$$

式中 S 为需要处理的原始信号; d_n ($n=1,2,3,4$) 为第 n 层变换的分解系数,也就是信号中的高频成分; a_4 为第 4 层变换后的近似系数,也就是信号中的低频成分。小波去噪法利用小波对信号进行分解,设置各层细节信号的阈值,然后对阈值和细节系数进行比较,常用的阈值处理策略包括硬阈值和软阈值,这里采取软阈值处理,最后重构处理好的信号。十一点平滑^[21]是对相邻的 11 个数据($i_1, i_2, i_3, \dots, i_{11}$)作平滑处理,则有

$$S = \frac{i_1 + i_2 \times 3 + i_3 \times 5 + i_4 \times 7 + i_5 \times 9 + i_6 \times 11 + i_7 \times 9 + i_8 \times 7 + i_9 \times 5 + i_{10} \times 3 + i_{11}}{1 + 3 + 5 + 7 + 9 + 11 + 9 + 7 + 5 + 3 + 1}。 \quad (9)$$

不同去噪方法的效果对比如图 3 所示。从图中可以看出,小波去噪后的结果会放大原始信号有外界信号干扰时的信号特征;五点三次平滑和十一点平滑两种处理方法均平滑了原始信号,但是十一点平滑后的结

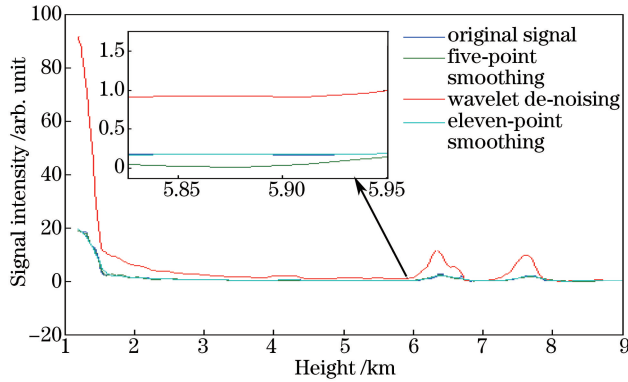


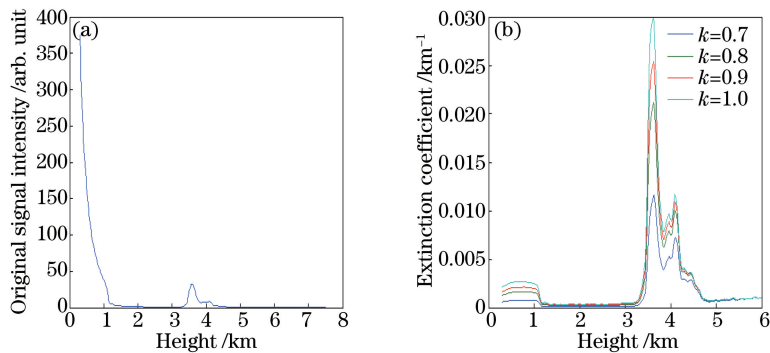
图3 不同去噪方法的效果对比图

Fig. 3 Comparison of results of different de-noising methods

果曲线更接近原始信号。综合分析,发现十一点平滑方法处理信号噪声的效果更好,且不会更多地改变原始信号。

3.2 波长指数参数的选取

(3)式中有两个未知量 k 和 σ_m ,当 k 取经验值 1 时,对信号的距离校正曲线 [$S_0 = S(r)$] 进行拟合,由拟合曲线的斜率可计算得到 σ_m 。由于 k 与激光雷达波长、所探测的大气气溶胶性质有关,且 k 的取值范围为 $0.67 \leq k \leq 1.0$ ^[19]。因此,在 $0.67 \leq k \leq 1.0$ 区间取间隔为 0.1 的 4 个 k 值进行反演,对反演结果进行比较,结果如图 4 所示。反演结果在原始信号出现波动的地方对应出现大幅度波动,且波动幅度会随着 k 的改变而发生变化; k 增大,则峰值增大,但不改变整体趋势。

图4 (a)原始信号强度;(b)改变 k 值后消光系数的反演结果Fig. 4 (a) Original signal intensity; (b) inversion result of extinction coefficient after changing value of k

3.3 边界值的选取

由于斜率法对相对光滑区域的选择主观性比较强,因而经常会出现反演结果错误的现象,经过多次验证发现,参考高度处的消光系数取 $1 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ 附近比较合适^[20],在该固定值附近选取 $8 \times 10^{-6}, 1 \times 10^{-5}, 1.2 \times 10^{-5}, 1.4 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$,反演结果如图 5 所示,发现在原始信号出现波动的位置,大气气溶胶消光系数曲线的波动更大,且原始信号中波动越大,在消光系数曲线对应位置处的波动越大。图 5(a)中曲线在 3.6~4.2 km 范围内出现了两个波动,前一处的波动比后一处的波动明显。由图 5(b)可知,消光系数曲线在 3.6~4.2 km 范围内也出现了两处波动,且前一波动放大的幅度比后一波动放大的幅度更大。由此可以看出,在相同条件下,随着 σ_m 的增大,消光系数曲线的峰值变大,改变 σ_m 不会改变消光系数曲线的变化趋势。

3.4 激光雷达比

在 Fernald 反演方法中,激光雷达比和参考高度处的消光系数是不确定的。研究指出,南京地区 σ_m 的经验值为 $8 \times 10^{-6} \text{ km}^{-1}$ ^[21-22]。大气分子具有稳定的光学特性,依照 Rayleigh 散射理论可以求得大气分子的激光雷达比,再依据 1976 年美国标准大气估算便可得到大气分子的消光系数。然而,大气气溶胶的激光雷达比是不确定的量,激光雷达比的选取对反演结果准确性影响较大,且 S_a 受激光波长、大气气溶胶的分布和大

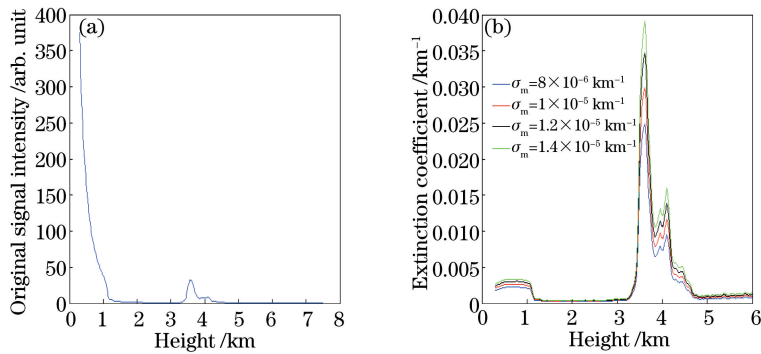


图 5 (a)原始信号强度;(b) σ_m 取固定值的反演结果

Fig. 5 (a) Original signal intensity; (b) inversion result when σ_m is fixed value

气溶胶的折射率等诸多因素的影响。研究人员进行了大量的相关研究,结果表明:在反演计算纬度地区对流层大气气溶胶光学特性时, S_a 的取值范围为 $20 \sim 70$ ^[23],反演结果曲线如图 6 所示。从图中可以看出, S_a 在 $20 \sim 70$ 范围内取不同的值时,激光雷达比的取值不同,大气气溶胶反演结果也不同;由于图 6 中的曲线几乎重合,因此认为 S_a 在 $20 \sim 70$ 范围内的取值对南京地区大气气溶胶光学特性反演结果的影响不大,但从局部放大图中可以看出,在该范围内,随着激光雷达比取值的增大,反演得到的消光系数会降低。

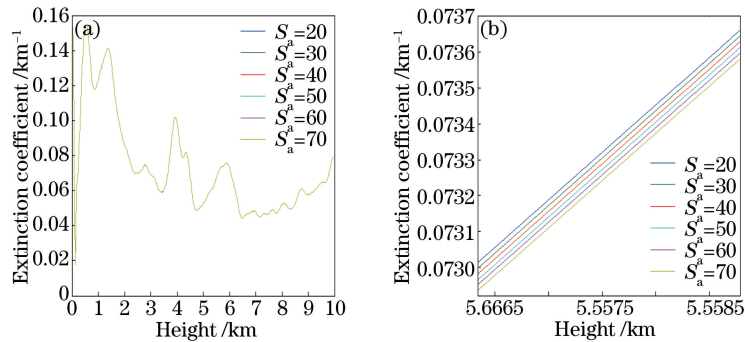


图 6 (a)不同激光雷达比对应消光系数的对比图;(b)图 6(a)的部分放大图

Fig. 6 (a) Comparison of extinction coefficients corresponding to different lidar ratios;

(b) partial amplification of Fig. 6 (a)

3.5 Fernald 和 Klett 方法反演结果对比

由图 7 可以看出,在大气气溶胶含量较低的位置,两种方法反演的消光系数结果存在差异,在大气气溶胶含量高的位置,两种方法反演的消光系数结果几乎无差别,这可能是因为 Klett 方法假设大气气溶胶的含量比较高,其在消光系数反演中占主导地位^[24];Fernald 方法虽然分开计算了大气分子和大气气溶胶对消光系数反演结果的影响,但在大气气溶胶含量较高的区域,大气气溶胶对消光系数反演结果的影响远大于大气分子的影响,因此大气分子的影响可以忽略不计。

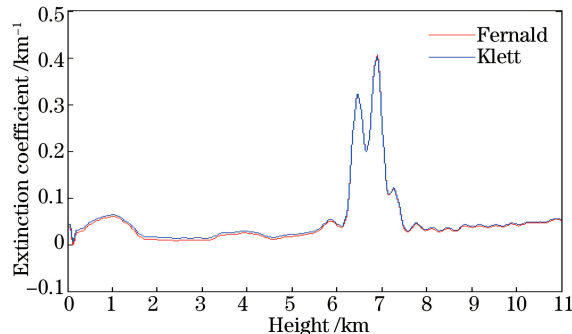


图 7 利用 Fernald 和 Klett 方法反演消光系数的结果对比图

Fig. 7 Comparison of inversion extinction coefficients by Fernald method and Klett method

4 结 论

从反演的结果可以看出,将高度为 10 km 以上采集信号的平均值作为背景噪声更好;对米氏信号进行再处理时,采用平滑去噪的方法效果较好,其中采用十一点平滑处理的效果最优,采用五点三次平滑处理的效果次之。Klett 方法中的 k 值在 0.67~1.0 之间取值, k 值的变化影响消光系数的峰值,随着 k 值的增大,消光系数的峰值增大,但不会改变消光系数整体的变化趋势;当参考高度处消光系数 σ_m 固定时,随着 σ_m 的增大,消光系数的峰值变大,消光系数整体的变化趋势不变。利用 Fernald 方法反演大气气溶胶消光系数时,大气气溶胶激光雷达比在 20~70 之间取值,发现随着激光雷达比的变化,大气气溶胶消光系数也随之变化,但在此范围内的取值对反演结果影响不大;从局部放大图中可以看出,在取值范围内,随着激光雷达比取值的增大,反演得到的消光系数会减小;通过计算发现,在大气气溶胶含量较低的位置,采用 Fernald 方法和 Klett 方法反演得到的结果存在差异,而在大气气溶胶含量高的位置,两种方法的反演结果几乎一样。

参 考 文 献

- [1] Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. Atmospheric aerosol tutorial[M]. Beijing: Meteorological Press, 1995.
章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- [2] Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- [3] Wang Mingxing, Zhang Renjian. Frontier of atmospheric aerosols researches[J]. Climatic and Environmental Research, 2001, 6(1): 119-124.
王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 119-124.
- [4] Zhang Xiaoye. Aerosol over China and their climate effect[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(1): 12-16.
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.
- [5] Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0113001.
- [6] Zhang Hongyu, Fan Guihua, Zhang Tinghua, *et al.* Research on wavelet denoising for echo signal of lidar[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(5): 52-55.
张宏宇, 樊桂花, 张廷华, 等. 激光雷达回波信号的小波去噪研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5): 52-55.
- [7] Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios[J]. Applied Optics, 1985, 24(11): 1638-1643.
- [8] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: Some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [9] Kovalev V A, Bristow M P. Compensational three-wavelength differential-absorption lidar technique for reducing the influence of differential scattering on ozone-concentration measurements[J]. Applied Optics, 1996, 35(24): 4790-4797.
- [10] Wang Xiangchuan, Rao Ruizhong. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(10): 1321-1325.
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1321-1325.
- [11] Doherty S L, Anderson T L, Charlson R J. Measurement of the lidar ratio for atmospheric aerosols with a 180° backscatter nephelometer[J]. Applied Optics, 1999, 38(9): 1823-1832.
- [12] Spinhirne J D, Reagan J A, Herman B M. Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in the troposphere by lidar technique[J]. Journal of Applied Meteorology, 1980, 19(4): 426-438.
- [13] Xia Junrong. Lidar measurement of atmospheric aerosol radiative properties over Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
夏俊荣. 利用激光雷达探测兰州大气气溶胶辐射特性[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [14] Min Min, Wang Pucui, Zong Xuemei. Extinction to backscatter ratio of cirrus clouds retrieved by spaceborne lidar over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(3): 506-512.
闵敏, 王普才, 宗雪梅. 中国地区卷云消光后向散射比的星载激光雷达遥感[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 506-512.

- [15] Wu Decheng, Liu Bo, Qi Fudi, *et al.* Tropospheric aerosols optical properties measured by a Raman-Mie lidar[J]. Journal of Atmospheric & Environmental Optics, 2011, 6(1): 18-26.
吴德成, 刘博, 戚福弟, 等. Raman-Mie 激光雷达测量对流层大气气溶胶光学特性[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 18-26.
- [16] 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.
- [17] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [18] Cao N W, Zhu C X, Kai Y F, *et al.* A method of background noise reduction in lidar data[J]. Applied Physics B, 2013, 113(1): 115-123.
- [19] Zhang Wenyu, Wang Yinqi, Song Jiayao, *et al.* Research on logarithmic k of aerosol backscatter extinction using lidar[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1083-1087.
张文煜, 王音淇, 宋嘉尧, 等. 激光雷达反演参数 k 值的研究[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1083-1087.
- [20] Zhu Cunxiong, Cao Nianwen, Yang Fengkai, *et al.* Micro pulse lidar observations of aerosols in Nanjing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 050101.
祝存兄, 曹念文, 杨丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 050101.
- [21] Huang Zhenting. Multi-point smooth extrapolation of measured data[J]. Radio Engineering, 1981, 11(4): 3-17.
黄振汀. 测量数据的多点平滑外推[J]. 无线电工程, 1981, 11(4): 3-17.
- [22] Cao N W, Yang F K, Zhu C X. Improving the accuracy of aerosol extinction coefficient inversion[J]. Optics and Spectroscopy, 2014, 116(4): 699-703.
- [23] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. Applied Optics, 1996, 35(24): 4941-4952.
- [24] Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101003
曹念文, 颜鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101003