

米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线

沈 吉, 曹念文

南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

摘要 介绍了基于米-拉曼散射激光雷达的南京北郊大气气溶胶观测实验,采用小波分析中的软硬阈值方式处理拉曼散射激光雷达回波信号,选取不同的阈值和不同的小波函数处理拉曼散射激光雷达回波信号,得到了平滑的拉曼散射激光雷达信号。根据拉曼散射激光雷达原理反演对流层高空大气气溶胶消光系数廓线,借助弗纳尔德方法并利用米散射激光雷达气溶胶观测数据,反演得到对流层低空大气气溶胶消光系数廓线。实验观测系统中有瑞利、米散射和拉曼散射 3 个接收通道,重点研究了米散射和拉曼散射通道接收到的观测数据,对南京北郊 2011-12-08 晚间拉曼散射激光雷达的气溶胶观测数据进行 4 种不同阈值处理。选择合适的阈值对实验观测数据进行去噪,然后利用反演原理公式并结合距离修正信号对观测数据进行反演,得到对流层高空大气气溶胶消光系数廓线;利用其中一处的气溶胶消光系数可以反演得到对流层低空大气气溶胶消光系数廓线。利用米-拉曼散射激光雷达联合反演对流层气溶胶消光系数廓线,可以清晰看出气溶胶的分布特征,对流层低空自由大气的气溶胶消光系数最大值一般为 0.1 km^{-1} 左右,表明对流层低空自由大气比较干净;对流层高空大气气溶胶消光系数在云影响下可达 6 km^{-1} ,无云时气溶胶消光系数最大值一般为 0.1 km^{-1} 左右,表明高空大气比较干净。

关键词 大气光学; 气溶胶; 消光系数; 拉曼散射; 米散射; 小波去噪

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0610003

Inversion of Tropospheric Aerosol Extinction Coefficient Profile by Mie-Raman Scattering Lidar

Shen Ji, Cao Nianwen

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

Abstract An observation experiment of atmospheric aerosol based on Mie-Raman scattering lidar in northern suburb of Nanjing is introduced. A soft and hard threshold method is used to deal with Raman scattering lidar's echo signal with wavelet analysis, and different thresholds and different wavelet functions are selected to process the Raman scattering lidar's echo signal. Smoothed Raman scattering lidar's echo signal is obtained. Upper tropospheric atmospheric aerosol extinction coefficient profiles are inversed based on Raman scattering lidar principle. With the Fernald method and the Mie scattering lidar's observation data of aerosol, the atmospheric aerosol extinction coefficient profile in low tropospheric can be obtained. There are three receiving channels in the experimental observation system, including Rayleigh, Mie and Raman scattering channels. The data observed in Mie and Raman scattering channels are mainly studied. Raman scattering lidar's aerosol observational data on 2011-12-08 in northern suburb of Nanjing is processed by four different thresholds. Appropriate threshold is selected to denoise the experimental observed data, and we use the formula of the inversion principle and combine with the distance correction signal to inverse the observed data, and the extinction coefficient profiles of the upper tropospheric atmospheric aerosol are obtained. The aerosol extinction coefficient profiles of low troposphere atmospheric aerosol can be retrieved based on one of the aerosol extinction coefficients of upper tropospheric atmospheric aerosol. After the Mie-Raman scattering lidar joint inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile, we can clearly

收稿日期: 2017-11-30; 收到修改稿日期: 2017-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375044/D0503;41175033/D0503)

作者简介: 沈 吉(1994—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达探测大气方面的研究。E-mail: 1624421539@qq.com

导师简介: 曹念文(1967—),男,博士,教授,主要从事激光雷达探测大气方面的研究。E-mail: nwcaomail@163.com

find the distributions of aerosol characteristics. The maximum value of aerosol extinction coefficient of low tropospheric free atmosphere is generally about 0.1 km^{-1} , and it shows that free atmospheric of low tropospheric is relatively clean. The aerosol extinction coefficient of upper tropospheric can reach 6 km^{-1} under the influence of the cloud, and the maximum value of aerosol extinction coefficient is about 0.1 km^{-1} when there is no cloud. The result shows that the upper atmosphere is relatively clean.

Key words atmospheric optics; aerosol; extinction coefficient; Raman scattering; Mie scattering; wavelet denoising

OCIS codes 010.1100; 010.1310; 010.3640

1 引 言

大气气溶胶是指由均匀分散于大气中的固体微粒和液体微粒所构成的稳定混合体系,其中的微粒统称为气溶胶粒子。气溶胶直接或间接地影响大气辐射能量收支。气溶胶对大气辐射的直接作用涉及对太阳辐射的反射与吸收,进而影响行星反照率和气候系统。气溶胶对大气辐射的间接作用表现为:气溶胶参与大气化学过程并作为云凝结核,造成大气成分的改变,间接地影响对太阳辐射能的吸收。作为云凝结核的气溶胶,还会影响云的寿命,降水特性也将受到影响^[1]。

目前,气溶胶的气候效应已经成为研究全球气候变化的一个热点问题,气溶胶光学参数的测量也受到越来越广泛的重视。王英等^[2]建立了气象能见度与大气消光系数的关系式,通过统计大量气象数据,分析北京大气消光特性的变化规律;杜萍等^[3]讨论并建立了新模式,利用晴空无云条件下地面实测的太阳直接辐射资料来反演宽频上的气溶胶光学厚度;吴立新等^[4]利用一些算法处理太阳光度计地基观测资料,得到多个气溶胶光学特性参数;Potdar 等^[5]建立了卫星遥感资料与气溶胶光学厚度间的关系。虽然国内外研究人员已经利用各种气象资料取得了很多研究成果,但是大部分气象资料并不适用于区域气候效应的研究。随着研究人员对区域气候效应研究的深入,研究中气溶胶监测资料的实时性、连续性及探测精度的要求更高。现阶段,微脉冲激光雷达的探测精度比气象能见度、太阳辐射计和卫星遥感的探测精度都要高,且对气溶胶监测资料的实时性和连续性也比较好,所以比较适用于区域气候效应的深入研究。采用微脉冲激光雷达可以很好地对气溶胶光学特性进行实时和连续监测,不仅能够更加深入地研究气溶胶的气候效应,还可以研究污染物的扩散和预报大气能见度。

本文利用米-拉曼散射激光雷达联合反演对流层大气气溶胶消光系数廓线。拉曼散射激光雷达测量气溶胶消光系数廓线的方法^[6]打破了克莱特方法^[7]和弗纳尔德方法^[8]的局限性,其反演过程不需要任何边界值,也不需要假设雷达比,便可以大幅减小误差。由于拉曼散射激光雷达的回波信号弱,信号中掺杂大量噪声,因此不适合直接用于反演大气气溶胶消光系数廓线^[9]。利用小波变换^[10-13]对回波信号进行去噪,可以打破傅里叶变换时频不稳定的局限性和提高气象观测数据的准确性。本文在 Matlab 环境下对几组拉曼散射激光雷达的回波信号进行小波去噪,再根据拉曼散射激光雷达接收回波信号的原理反演出大气气溶胶消光系数廓线。同时,利用米散射激光雷达,并借助弗纳尔德方法,反演对流层低空大气气溶胶消光系数廓线。由于对流层低空大气气溶胶随天气变化而变化,因此选取固定标定值有很大的缺陷,为解决反演方法中的定标问题,标定高度处的气溶胶消光系数可以从拉曼散射激光雷达精确反演的大气气溶胶消光系数廓线中得到。

2 实验观测系统与反演方法

2.1 实验观测系统

实验使用瑞利-拉曼-米三通道激光雷达(RRML),并将其置于南京信息工程大学内的中国气象局综合观测实验基地(地理坐标为 118.7°E , 32.2°N)。实验观测系统结构示意图如图 1 所示。

RRML 系统放置在一个水平工作台上,实验室内保持恒温。激光雷达发射波长为 532 nm 的激光,望远镜接收的后向散射光包括波长为 532 nm 的信号和波长为 607 nm 的拉曼信号。分色镜可将不同波长的信号分离。波长为 607 nm 的散射光被全部反射到拉曼通道;波长为 532 nm 的散射光经分束镜后分为两部分,一部分光被反射到瑞利通道,另一部分光被米通道接收。拉曼通道和瑞利通道设有不同的门控,且延时可调,由于拉曼信号与瑞利信号都很微弱,需要采用高灵敏度、高量子效率的光电倍增管来提高信噪比,再利

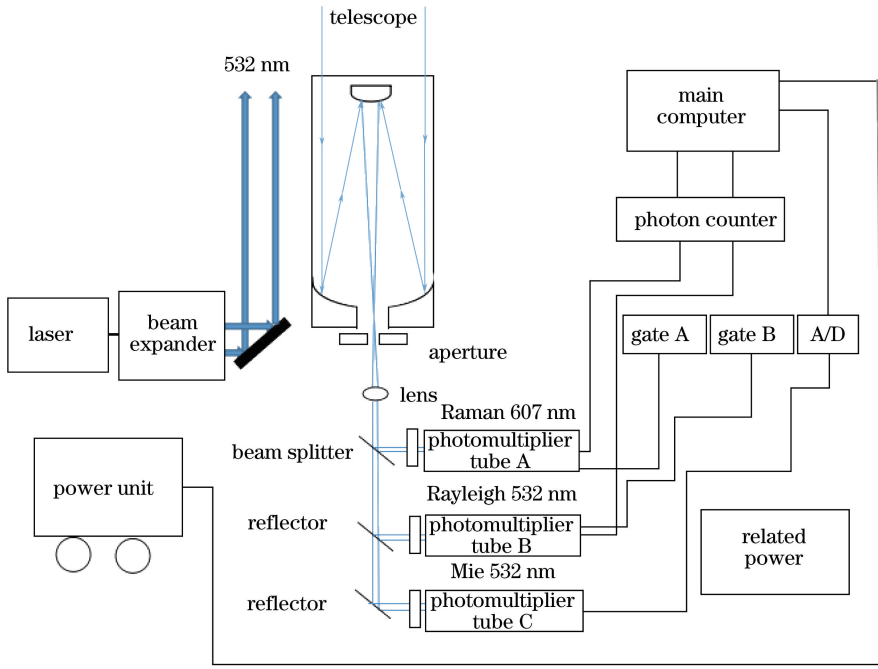


图 1 实验观测系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of experimental observation system

用光子计数卡进行检测。米通道接收到的散射光信号通过光电倍增管后直接由模/数(A/D)数据采集卡采集,并将所采集到的数据全部存储在计算机中。拉曼通道与瑞利通道的光子计数卡可调节通道的垂直分辨率,垂直分辨率有 150 m 和 30 m 2 种,在实际测量过程中,只能对高、低空进行分别测量,一般以 10^4 脉冲积分作为一个数据文件,将 5 次积分作为一组。值得注意的是,RRML 的激光发射和接收并不在一条直线上,属于旁轴体系,近点接收会产生误差,需要修正。

2.2 反演方法

2.2.1 拉曼散射激光雷达测量气溶胶消光系数的方法

氮拉曼散射激光雷达接收后向散射信号的方程为

$$P_{\lambda_R}(z) = K \frac{O(z)}{z^2} N_R(z) \frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega} \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(\zeta) + \alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(\zeta) + \alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(\zeta) + \alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(\zeta)] d\zeta\right\} P_n, \quad (1)$$

式中 $P_{\lambda_R}(z)$ 为接收距离 z 处拉曼波长为 λ_R 的信号功率; $O(z)$ 为雷达接收视场角重叠函数; K 包含了所有与距离无关的系统参数; $N_R(z)$ 为氮气分子在距离 z 处的数密度; $d\sigma_{\lambda_R}(\pi)/d\Omega$ 为与距离无关的拉曼后向截面微分; $\alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(\zeta)$ 和 $\alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(\zeta)$ 分别为弹性后向散射雷达波长 λ_0 和拉曼波长 λ_R 的大气分子消光系数; $\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(\zeta)$ 和 $\alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(\zeta)$ 分别为弹性后向散射雷达波长 λ_0 和拉曼波长 λ_R 的气溶胶消光系数; P_n 为背景噪声。

根据(1)式可得

$$\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(z) = \frac{\frac{d}{dz} \left\{ \ln \frac{N_R(z)}{[P_{\lambda_R}(z) - P_n] z^2} \right\} - \alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z) - \alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)}{1 + (\lambda_0/\lambda_R)^k}, \quad (2)$$

式中 $\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(z)/\alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(z) = (\lambda_0/\lambda_R)^k$,气溶胶的直径比激光波长大,一般选取 $k = 1$ 较合理。

2.2.2 Fernald 方法

激光雷达接收到距离 z 处的回波信号功率为

$$P(z) = \frac{CP_0}{z^2} \beta(z) \exp\left[-2 \int_0^z \sigma(z') dz'\right], \quad (3)$$

式中 P_0 为激光脉冲平均功率, C 为雷达常数, $\beta(z)$ 为大气后向散射系数, $\sigma(z')$ 为大气消光系数。

假定 $\sigma = \sigma_1(z) + \sigma_2(z)$, $\beta = \beta_1 + \beta_2$, $S_1 = \sigma_1(z)/\beta_1$, $S_2 = \sigma_2(z)/\beta_2 = 8\pi/3$,其中 $\sigma_1(z)$ 为高度为 z 处的

气溶胶消光系数, σ_2 为高度为 z 处的大气分子消光系数, β_1 为气溶胶后向散射系数, β_2 为大气分子后向散射系数, S_1 为气溶胶雷达比, S_2 为大气分子雷达比。气溶胶雷达比取常数值, 一般认为对流层 S_1 的取值范围在 10 ~ 90 之间^[14], 在南京冬季低空污染较重的情况下, 取 $S_1 = 20$ 。

根据(3)式和假定条件, 利用后向积分^[8]可得

$$\sigma_1(z) = -\frac{S_1}{S_2}\sigma_2(z) + \frac{X(z)\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_z^{z_c}\sigma_1(z')dz'\right]}{\frac{X(z_c)}{\sigma_1(z_c) + \frac{S_1}{S_2}\sigma_2(z_c)} + 2\int_z^{z_c}X(z')\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_z^{z_c}\sigma_2(z'')dz''\right]dz'}, \quad (4)$$

式中 $X(z) = P(z)z^2$, z_c 为标定高度。

3 资料处理及分析计算

3.1 小波变换去噪与雷达资料处理

3.1.1 小波去噪分析

在实际工作中, 有用信号通常表现为低频或较平稳的信号, 噪声信号表现为高频信号。小波去噪的步骤包括: 1) 对实际信号进行小波分解, 得到多对正交小波基; 2) 对小波分解的高频系数进行门限阈值量化处理; 3) 将低频系数与经过量值化的高频系数进行小波重构。

在 Matlab 环境下进行小波去噪, 选择合适的阈值缩减方式、自适应阈值和小波基函数来处理拉曼散射激光雷达距离矫正信号。对超过阈值的小波系数进行缩减的处理方式主要有两种: 软阈值化和硬阈值化。软阈值化和硬阈值化后的小波系数可分别表示为

$$W_\eta = \begin{cases} \text{sgn}(W)(|W| - \eta) & |W| \geq \eta \\ 0 & |W| < \eta \end{cases}, \quad (5)$$

$$W_\eta = \begin{cases} W & |W| \geq \eta \\ 0 & |W| < \eta \end{cases}, \quad (6)$$

式中 W 为分解得到的小波系数, η 为阈值。

自适应阈值的选择有 4 种: 1) 固定式阈值(sqtwolog), 使用全局阈值 $\eta = \sqrt{2\lg P}$, P 为原始信号; 2) 启发式阈值(heursure); 3) 无偏风险估计阈值(rigrsure stein); 4) 极小化极大原理选择阈值(minimaxi)。

3.1.2 资料处理实例

根据(2)、(4)式都可以求得气溶胶消光系数廓线, 针对拉曼散射激光雷达回波信号弱的问题, 在小波去噪之前, 需要对拉曼散射激光雷达回波信号进行背景噪声修正处理, 背景噪声功率 P_n 一般取 10 W 左右的一个常数值。由于米散射激光雷达回波信号的功率较大, 不需要背景噪声修正, 只需要将整体数据与数据中的最小值作差, 便可去掉数据中的负值。利用瑞利激光雷达反演大气分子消光系数廓线时, 廓线变化比较稳定^[15], 因此用常数代替大气分子消光系数, 对流层大气以 10^{-2} km^{-1} 取代。激光雷达通道波长 $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$, 拉曼散射激光雷达通道波长 $\lambda_R = 607 \text{ nm}$ 。(2)式中 z 的微分值对气溶胶消光系数的影响很大, 所以对 z 进行微分的量将采取如下处理: 1) 氮气数密度 $N_R(z)$ 廓线变化比较稳定^[16-17], 用常数替代 $N_R(z)$ 的值, 该值在对流层取 $0.6 \times 10^{34} \text{ km}^{-3}$; 2) 将 $[P_{\lambda_R}(z) - P_n]z^2$ 作为一个整体进行去噪处理[图 2 中 a 曲线是将激光雷达原始数据与 z^2 相乘后再进行小波去噪得到的, b 曲线是将激光雷达原始数据先进行小波去噪后再与 z^2 相乘得到的, $P = P_{\lambda_R}(z) - P_n$], 可以避免单独对 $P_{\lambda_R} - P_n$ 进行小波去噪时 z^2 对信号的扰动影响。

(4)式中的标定高度取 5 km, 标定高度处的气溶胶消光系数来自拉曼散射激光雷达反演的大气气溶胶消光系数廓线。

取部分对流层拉曼散射激光雷达回波数据在 Matlab 环境下利用小波软硬阈值进行去噪处理, 并与 4 种自适应阈值去噪处理进行对比。研究分析发现, 软阈值处理的信号更加平滑, 4 种自适应阈值中固定式阈值对信号的去噪效果更好。图 3 比较了利用软硬阈值处理信号的效果。两种方式的自适应阈值均采用 sqtwolog 固定式, 小波基函数均采用 sym11。图 4 比较 4 种自适应阈值处理信号的效果, 4 种方案均采用软

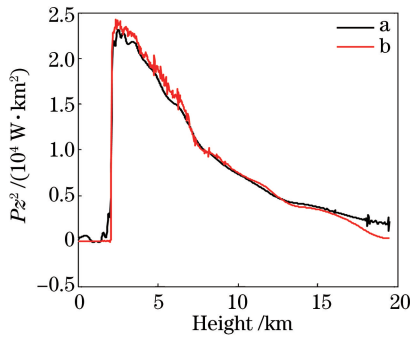


图 2 2011-12-08 19:37:28 的激光雷达信号去噪效果对比图

Fig. 2 Comparison of denoising effect of lidar signal at 19:37:28 on 2011-12-08

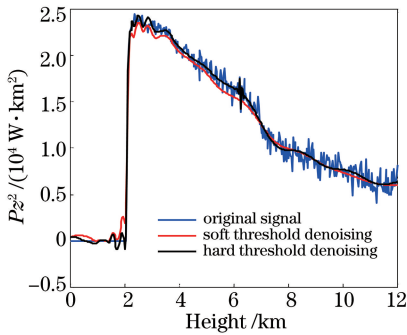


图 3 2011-12-08 19:37:28 的激光雷达对层信号数据的软硬阈值小波去噪效果对比图

Fig. 3 Comparison of wavelet denoising effect between soft and hard thresholds of troposphere signal data of lidar at 19:37:28 on 2011-12-08

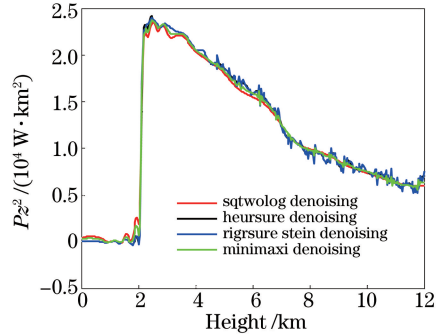


图 4 2011-12-08 19:37:28 的激光雷达信号数据的不同阈值小波去噪效果对比图

Fig. 4 Comparison of wavelet denoising effect of lidar signal data with different thresholds at 19:37:28 on 2011-12-08

阈值方式进行处理,小波基函数均采用 sym11。

图 5、6 是 8 个时刻的拉曼散射激光雷达信号经过小波去噪后的效果对比图,这 8 个时刻的信号均采用软阈值方式处理,自适应阈值均采用 sqtwolog 固定式,图 5(a)~(d)与图 6(a)~(d)的小波基函数分别为 sym11、

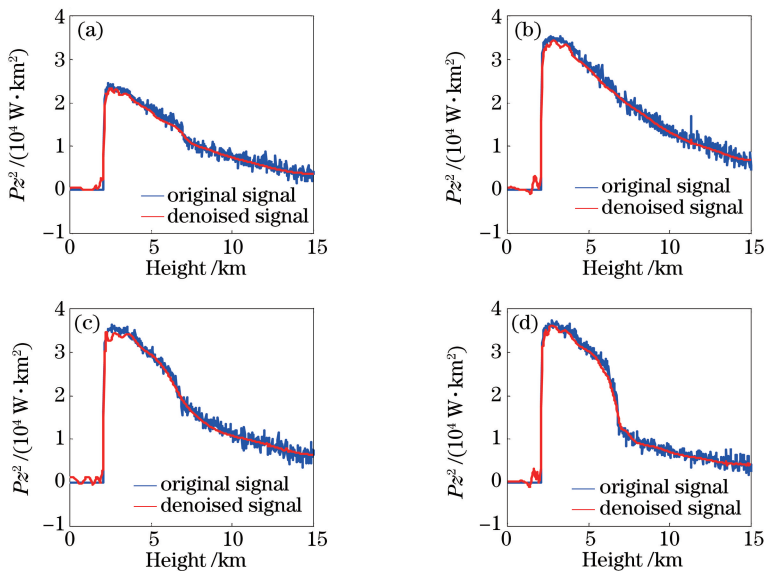


图 5 2011-12-08 拉曼散射激光雷达信号小波去噪效果对比图。(a) 19:37:28;(b) 20:02:32;(c) 20:11:13;(d) 20:19:34

Fig. 5 Comparison of wavelet denoising effect of Raman scattering lidar signal on 2011-12-08. (a) 19:37:28;

(b) 20:02:32; (c) 20:11:13; (d) 20:19:34

sym15、sym10、sym13、sym11、sym3、sym10 和 sym10。从图中可以发现,小波去噪信号在近距离处明显失真,所以选取 4 km 以上高度的平滑信号进行大气消光系数反演,从而减小近距离失真信号造成的影响。

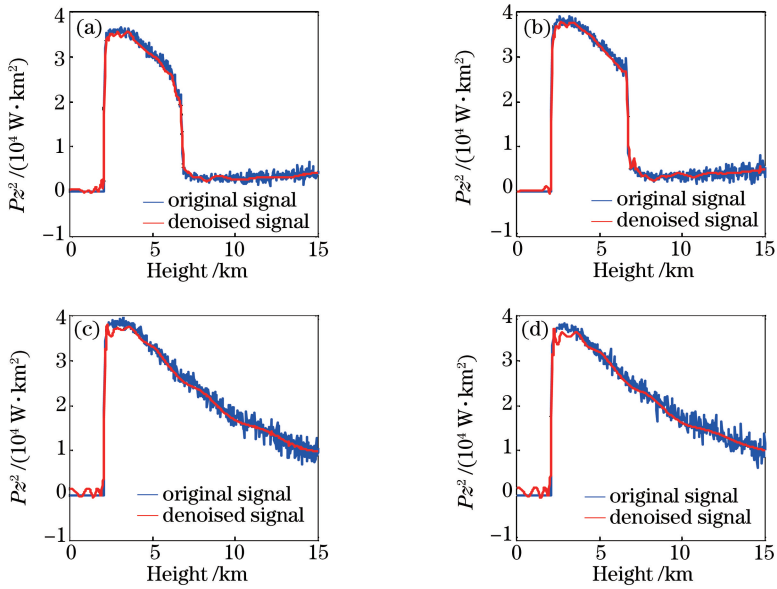


图 6 2011-12-08 拉曼散射激光雷达信号小波去噪效果对比图。(a) 20:27:56;(b) 21:01:45;(c) 21:27:21;(d) 21:35:43
Fig. 6 Comparison of wavelet denoising effect of Raman scattering lidar signal on 2011-12-08. (a) 20:27:56;
(b) 21:01:45; (c) 21:27:21; (d) 21:35:43

3.2 气溶胶消光系数的反演结果分析

选取 2011-12-08 晚上部分时间段的两个不同通道的激光雷达信号数据进行反演,得到一系列气溶胶消光系数廓线。为最大化利用拉曼通道与米通道反演对流层气溶胶消光系数廓线的优势,对两通道数据分别进行高、低空反演。在没有云影响的情况下,大气消光系数值为 0.1 km^{-1} 左右,说明大气气溶胶含量少,空气比较干净。南京地区的历史天气内容为:南京北郊 2011-12-08 的天气是小雨转多云,风向是北风,风力为 5~6 级转 4~5 级,最高气温为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$,最低气温为 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。冬季南京北郊常伴有卷云存在。

3.2.1 拉曼散射激光雷达数据的反演结果分析

从图 7 可以发现,对流层顶部的气溶胶消光系数很小,约为 0.05 km^{-1} 。从图 7(a)可以看出,高度为 4~12 km 之间的气溶胶消光系数在 7 km 左右出现最大值,约为 0.18 km^{-1} ,表明此刻南京北郊高空存在大量气溶胶;从图 7(b)可以看出,高度为 4~12 km 之间的气溶胶消光系数廓线波动起伏较小,并且气溶胶消光系数整体偏小,都不超过 0.1 km^{-1} ,表明此时高空只存在少量气溶胶;从图 7(c)可以看出,气溶胶消光系数最大值为 0.18 km^{-1} 左右,但是气溶胶消光系数最大值上方的谷值偏大,不小于 0.1 km^{-1} ,表明此刻南京北郊 4~12 km 之间存在层状气溶胶;从图 7(d)可以看出,4~12 km 之间的气溶胶消光系数在 7 km 左右有一个较大的峰值,为 0.7 km^{-1} 左右,峰值上方出现了一个极小的谷值,该现象可能是由大气中的薄云造成的,因为南京当日天气是小雨转多云,薄云对激光会造成很大的衰减。

从图 8(a)、(b)中都可以看出,高度为 7 km 左右出现一个很大的气溶胶消光系数,但是该值上方反演的气溶胶消光系数出现失真。图 8(a)、(b)中高度为 7 km 左右的气溶胶消光系数分别为 4 km^{-1} 和 6 km^{-1} 左右,查询到南京当日正值冬季,天气是小雨转多云,最低气温为 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$,由于南京冬季高空多冰晶云,因此认为 4 km^{-1} 和 6 km^{-1} 左右的消光系数可能是由松散的冰晶云造成的,冰晶云使图中 7 km 以上的气溶胶消光系数廓线反演失真。图 8(c)、(d)中高度为 4~12 km 之间的气溶胶消光系数整体偏小,两个时刻的气溶胶消光系数都不超过 0.1 km^{-1} ,可见这两个时刻的南京北郊在 4~12 km 之间的大气都比较干净。图 8(c)、(d)中的消光系数廓线都出现抖动^[18-20],由于实验过程中的激光能量比较稳定,因此认为该现象形成的原因与仪器无关,可能与大气中某种动力学过程有关,该现象有待今后进一步研究。

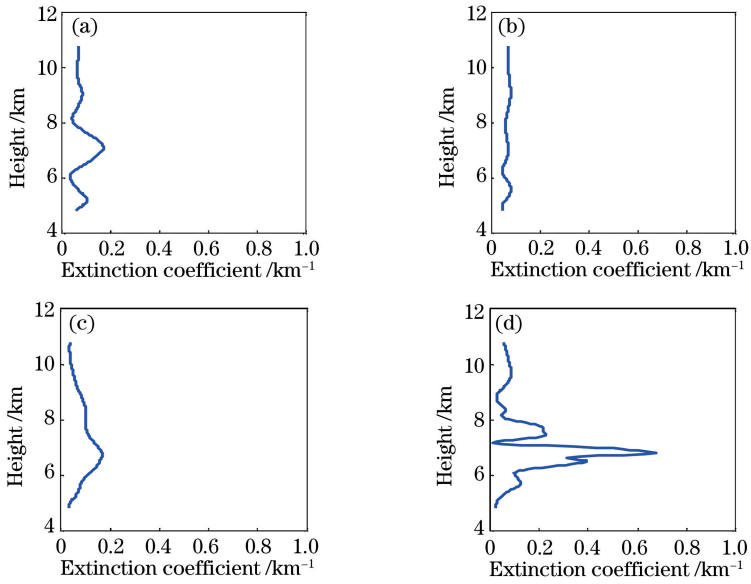


图 7 2011-12-08 对流层高空气溶胶消光系数廓线。(a) 19:37:28;(b) 20:02:32;(c) 20:11:13;(d) 20:19:34

Fig. 7 Aerosol extinction coefficient profiles of upper troposphere on 2011-12-08. (a) 19:37:28;
(b) 20:02:32; (c) 20:11:13; (d) 20:19:34

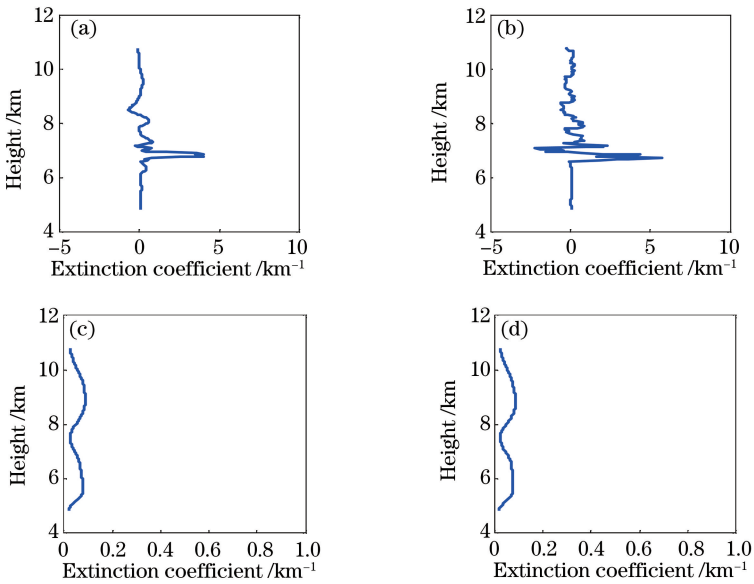


图 8 2011-12-08 对流层高空气溶胶消光系数廓线。(a) 20:27:56;(b) 21:01:45;(c) 21:27:21;(d) 21:35:43

Fig. 8 Aerosol extinction coefficient profiles of upper troposphere on 2011-12-08. (a) 20:27:56;
(b) 21:01:45; (c) 21:27:21; (d) 21:35:43

3.2.2 米散射激光雷达数据的反演结果分析

所研究的米散射激光雷达探测的高度范围为 1~4.5 km,一般情况下,高度为 5 km 以上的大气消光系数很小,近似于大气分子消光系数,所以在 4.5 km 以上的高度范围内用瑞利散射激光雷达探测较为合理。在实验观测系统中有 3 个通道,米散射激光雷达用来探测低层大气,瑞利散射激光雷达用来探测高层大气。

图 9、10 为 2011-12-8 对流层低空气溶胶消光系数廓线,8 张分图都呈现出中间小、两边大的分布特征,在高度为 1.5 km 左右出现了一个气溶胶消光系数最大值,为 0.15 km^{-1} 左右,可以近似认为 1.5 km 是 2011-12-8 南京北郊大气边界层的高度,该高度下方是近地面大气,近地面大气中通常聚集着大量气溶胶粒子。这里主要研究自由大气,大气边界层上方气溶胶消光系数小于 0.05 km^{-1} ,且光学参数几乎恒定不变,可以将此处的消光系数近似看作是大气分子的消光系数。

图 9(a)中在 1.5~3 km 高度范围内的气溶胶消光系数值均小于 0.05 km^{-1} , 在 3~5 km 高度范围内的气溶胶消光系数最大值为 0.1 km^{-1} 左右, 说明此时南京北郊高度范围为 1.5~5 km 的大气比较干净。图 9(b)中在 1.5~3.5 km 高度范围内的气溶胶消光系数均小于 0.05 km^{-1} , 3.5~5 km 高度范围内的气溶胶消光系数最大值为 0.07 km^{-1} 左右, 说明此时南京北郊在高度范围为 1.5~5 km 内的大气更加干净。图 9(c)、(d)中在 1.5~4 km 高度范围内的气溶胶消光系数均小于 0.05 km^{-1} , 在 4~5 km 高度范围内的气溶胶消光系数最大值都在 0.05 km^{-1} 左右, 表明在 2011-12-08 20:11:13 与 20:19:34 两个时刻, 南京北郊在 1.5~5 km 高度范围内的大气很干净。

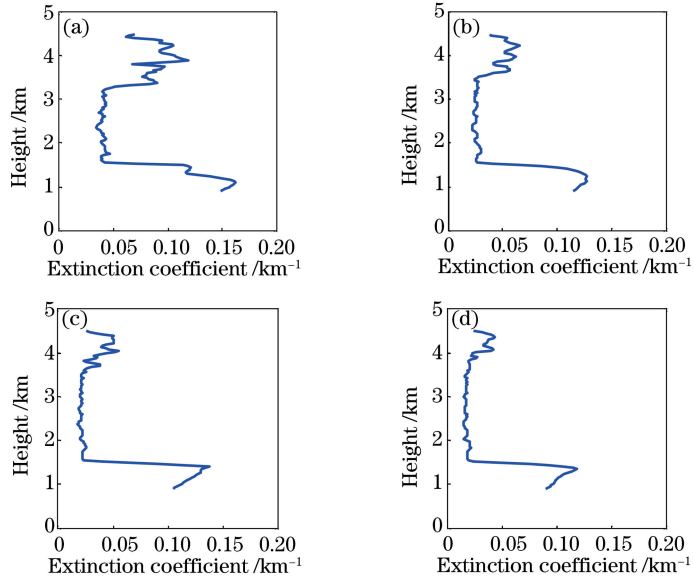


图 9 2011-12-08 对流层低空气溶胶消光系数廓线。(a) 19:37:28;(b) 20:02:32;(c) 20:11:13;(d) 20:19:34
 Fig. 9 Aerosol extinction coefficient profiles of low troposphere on 2011-12-08. (a) 19:37:28;
 (b) 20:02:32; (c) 20:11:13; (d) 20:19:34

图 10(a)~(d)的气溶胶消光系数廓线形状相似, 在 1.5~4 高度范围内的气溶胶消光系数均小于 0.05 km^{-1} , 在 4~5 km 高度范围内的气溶胶消光系数的最大值均为 0.05 km^{-1} 左右, 反演结果表明这 4 个

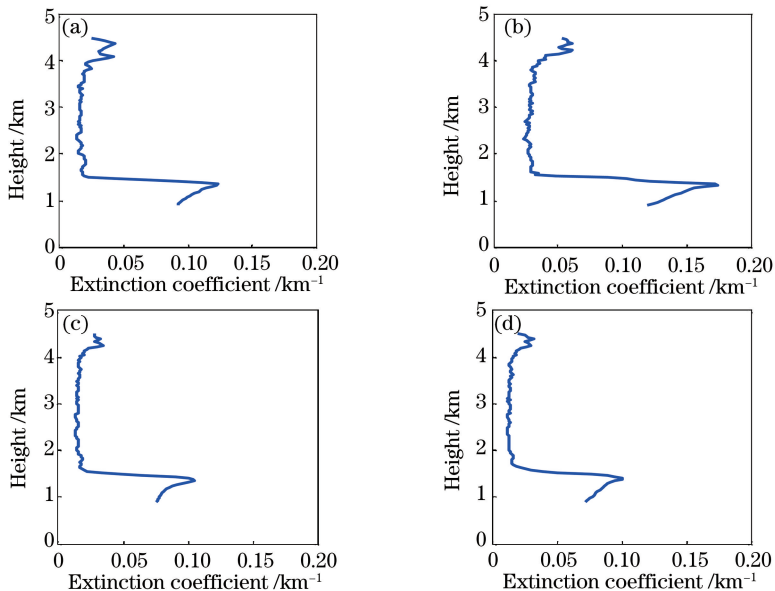


图 10 2011-12-08 对流层低空气溶胶消光系数廓线。(a) 20:27:56;(b) 21:01:45;(c) 21:27:21;(d) 21:35:43
 Fig. 10 Aerosol extinction coefficient profiles of low troposphere on 2011-12-08. (a) 20:27:56;
 (b) 21:01:45; (c) 21:27:21; (d) 21:35:43

时刻中南京北郊在 1.5~5 km 高度范围内的大气很干净。

4 结 论

对南京北郊 2011-12-08 晚间米-拉曼散射激光雷达的大气气溶胶观测数据进行了很好的去噪处理,结合激光雷达的反演原理,可得到一系列不同时刻对流层高、低空大气气溶胶消光系数廓线,并对这些大气气溶胶消光系数廓线进行分析,得到如下主要结论。

1) 拉曼散射激光雷达接收到的回波信号很弱,研究发现软阈值方式的 sqtwolog 固定式阈值小波函数能够很好地将拉曼散射激光雷达回波信号中的真实信号与噪声信号分离开,使拉曼散射激光雷达回波信号足够平滑,易于反演气溶胶消光系数廓线。

2) 拉曼散射激光雷达反演的对流层大气气溶胶消光系数廓线一般有很多波动,最大值一般为 0.1 km^{-1} 左右,说明对流层大气的高空中气溶胶分布不均匀,且气溶胶浓度较低。一些消光系数廓线图在高度约为 7 km 处的消光系数突然增大,而高度为 7 km 以上的消光系数很小,甚至出现负值,认为此高度应该有冰晶云即卷云存在。

3) 米散射激光雷达反演的对流层大气气溶胶消光系数廓线有很多相似特征,有利于辨识大气边界层和大气分子层,在高度为 4 km 左右处出现的气溶胶消光系数最大值为 0.1 km^{-1} 左右,表明南京北郊对流层低空自由大气比较干净。

4) 通过拉曼散射联合米散射激光雷达反演对流层大气气溶胶消光系数廓线,可以更加清楚地了解对流层大气的气溶胶分布状况;经过小波去噪处理得到的大气气溶胶消光系数廓线比较平滑,有利于研究人员对对流层高空大气的精细结构进行分析。

参 考 文 献

- [1] Li Junxia, Yin Yan, Li Peiren, *et al.* Advances in research on mechanism and observation of impacts of aerosol on cloud and precipitation[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(5): 581-590.
李军霞, 银 燕, 李培仁, 等. 气溶胶影响云和降水的机理和观测研究进展[J]. 气象科学, 2014, 34(5): 581-590.
- [2] Wang Ying, Li Lingjun, Li Chengcai. The variation characteristics and influence factors of atmospheric visibility and extinction effect in Beijing[J]. China Environmental Science, 2015, 35(5):1310-1318.
王 英, 李令军, 李成才. 北京大气能见度和消光特性变化规律及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1310-1318.
- [3] Du Ping, Qian Zeyu, Chen Changhe. A study of retrieving aerosol optical depths from direct solar irradiation[J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(1): 79-84.
杜 萍, 钱泽雨, 陈长和. 利用太阳辐射资料反演宽频上的气溶胶光学厚度[J]. 高原气象, 2002, 21(1): 79-84.
- [4] Wu Lixin, Lü Xin, Qin Kai, *et al.* Analysis to Xuzhou aerosol optical characteristics with ground-based measurements by sun photometer[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(20): 2287-2298.
吴立新, 吕 鑫, 秦 凯, 等. 基于太阳光度计地基观测的徐州气溶胶光学特性变化分析[J]. 科学通报, 2016, 61(20): 2287-2298.
- [5] Potdar M B, Sharma S A, Parikh V Y, *et al.* Remote sensing of spectral signatures of tropospheric aerosols[J]. Journal of Earth System Science, 2004, 113(1): 103-116.
- [6] Ansmann A, Wandinger U, Riebesell M, *et al.* Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar[J]. Applied Optics, 1992, 31(33): 7113-7131.
- [7] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [8] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [9] Cao N W, Yang S B, Xie Y H, *et al.* Aerosol profiling by Raman lidar in Nanjing, China[J]. Optics and Spectroscopy, 2015, 119(4): 700-707.
- [10] Xie Jianlin, Du Juan, Yuan Xiaoping. The study on wavelet denoising under the environment of MATLAB[J]. Energy Technology and Management, 2005(2): 71-72.
谢建林, 杜 娟, 袁小平. 基于 MATLAB 的小波去噪方法研究[J]. 能源技术与管理, 2005(2): 71-72.
- [11] Du Haofan, Cong Shuang. The study on wavelet denoising under the environment of MATLAB[J]. Computer

- Simulation, 2003, 20(7): 119-122.
- 杜浩藩, 丛 爽. 基于 MATLAB 小波去噪方法的研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(7): 119-122.
- [12] Wang Xinlou. Wavelet denoising method analysis and Matlab simulation[J]. Industrial Control Computer, 2008, 82(6): 55-56.
- 王新楼. 小波去噪方法分析与 Matlab 仿真[J]. 工业控制计算机, 2008, 82(6): 55-56.
- [13] Lin Dongsheng. Research on wavelet thresholding denoising method based on Matlab[J]. Computer Knowledge and Technology, 2013(11): 2662-2663.
- 林东升. 基于 Matlab 的小波阈值图像去噪方法研究[J]. 电脑知识与技术, 2013(11): 2662-2663.
- [14] Qiu Jinhuan, Zheng Siping, Huang Qirong, *et al.* Lidar measurements of cloud and aerosol in the upper troposphere in Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(1): 1-7.
- 邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 1-7.
- [15] Chi Ruli, Wu Decheng, Liu Bo, *et al.* Dual-wavelength Mie lidar observations 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.
- [16] Chen Junbin, Zhu Xia, Wang Kaijun, *et al.* Theoretical predictions for components of atmosphere convection layer varying by height above sea level[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014(4): 60-65.
- 陈俊斌, 朱 霞, 王凯俊, 等. 大气对流层气体组分随高度变化的理论预期[J]. 后勤工程学院学报, 2014(4): 60-65.
- [17] Xue Datong. Studies of altitude distribution of earth's atmosphere density[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(S1): 1-8.
- 薛大同. 对地球大气密度随高度分布规律的讨论[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(S1): 1-8.
- [18] Zheng Wengang, Li Hongjun, Yang Guotao, *et al.* Lidar detection of the atmospheric density and temperature over Wuhan[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(4): 397-402.
- 郑文钢, 李洪钧, 杨国韬, 等. 武汉上空大气密度温度的激光雷达探测[J]. 大气科学, 1999, 23(4): 397-402.
- [19] Chen Hao, Yi Fan. Rayleigh lidar and radiosonde observations of density and temperature in middle atmosphere over Wuhan[J]. Chinese Journal of Space Science, 2003, 23(4): 262-268.
- 陈 皓, 易 帆. 武汉上空对流层与平流层大气密度和温度探测的初步结果[J]. 空间科学学报, 2003, 23(4): 262-268.
- [20] Zou Xu, Yang Guotao, Wang Jihong, *et al.* Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at Hainan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(7): 2274-2282.
- 邹 旭, 杨国韬, 王继红, 等. 基于激光雷达手段的海南地区重力波与其波谱的季节分布特性研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(7): 2274-2282.