

拉曼散射激光雷达反演平流层气溶胶消光系数廓线

沈吉, 曹念文

南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要 介绍了位于南京北郊的拉曼散射激光雷达的基本结构, 描述了使用拉曼散射激光雷达反演平流层大气气溶胶消光系数廓线的数据处理方法。重点研究了南京北郊 2011-12-08 与 2011-12-09 晚间平流层气溶胶观测数据, 对拉曼散射激光雷达距离修正信号进行 4 种不同阈值的小波去噪, 选择出合适的阈值, 然后利用反演原理公式, 得到平流层大气气溶胶消光系数廓线, 分析了平流层大气气溶胶消光系数的变化特征。

关键词 大气光学; 气溶胶; 平流层; 消光系数反演; 拉曼散射; 小波去噪

中图分类号 P412; P413

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0609002

Inversion of Stratospheric Aerosol Extinction Coefficient Profile by Raman Scattering Lidar

Shen Ji, Cao Nianwen

Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Basic structure of Raman scattering lidar in northern suburb of Nanjing is introduced. Treatment method of the data of stratospheric atmospheric aerosol extinction coefficient profiles inverted by Raman scattering lidar principle is described. Stratospheric aerosol observational data on December 8 and 9, 2011 in northern suburb of Nanjing are emphatically processed. The Raman scattering lidar distance correction signal is denoised by wavelet under four different thresholds. Appropriate threshold is used to obtain the stratospheric atmospheric aerosol extinction coefficient profile by the formula of inversion principle. Variation characteristics of aerosol extinction coefficients in the stratosphere are analyzed at the same time.

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

OCIS codes 010.1100; 010.1310; 010.3640

1 引 言

平流层气溶胶对大气和地球环境的影响是多方面的, 它可以直接使平流层温度升高、行星反射率增加、地面温度降低^[1], 也可以间接影响大气环流、地球辐射收支所控制的气候等^[2]。换言之, 平流层气溶胶对大气环境影响的根本问题是平流层气溶胶与太阳短波辐射场和地球-大气长波辐射场的相互作用。可以认为, 平流层气溶胶的光学性质直接影响

着全球的大气环境状况。

激光雷达可以很好地探测平流层气溶胶。吴永华等^[3]曾利用 L625 激光雷达探测合肥上空的平流层气溶胶, 岩坂泰信等^[4]使用多波长激光雷达同时测量东京上空的平流层气溶胶层, 其方法对深入认识区域气候效应具有重要的科学意义。但是, 弹性激光雷达的气溶胶探测方法具有一定的局限性。而拉曼散射激光雷达(非弹性)测量气溶胶消光系数廓线的方法不需要任何边界值^[5-6], 也不需要假设雷达

收稿日期: 2017-11-03; **收到修改稿日期:** 2017-11-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0209600, 2017YFC0209603)、国家自然科学基金(41375044)

作者简介: 沈吉(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: 1624421539@qq.com

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

E-mail: nwcaomail@163.com(通信联系人)

比,可以打破克莱特方法^[7]和弗纳尔德方法^[8]的局限性,减少误差。Hee 等^[9]利用拉曼散射激光雷达获取激光雷达比,根据得到的激光雷达比区分对流层不同海拔高度处的气溶胶类型,Su 等^[10]也借助拉曼散射激光雷达提高对流层气溶胶光学性质的反演精度。二者都没有考虑处理小信号数据,这导致其测量结果不全面。由于拉曼散射激光雷达平流层回波信号小,真实信号中掺杂大量噪声,因此不能直接用于反演大气气溶胶消光系数廓线^[11-12]。文献^[13-16]利用小波变换对回波信号进行去噪,打破了傅里叶变换时频不稳定的局限性,提高了气象观测

数据的准确性。基于此,本文利用拉曼散射激光雷达探测平流层气溶胶的消光系数廓线,对几组拉曼散射激光雷达的回波信号进行小波去噪,根据拉曼散射激光雷达接收回波信号的原理反演出平流层大气气溶胶消光系数廓线。

2 实验系统与反演方法

2.1 实验观测系统

实验观测数据来自中国气象局综合观测实验基地(118.7°E, 32.2°N)的瑞利-拉曼-米氏激光雷达(RRML)。实验装置如图1所示。

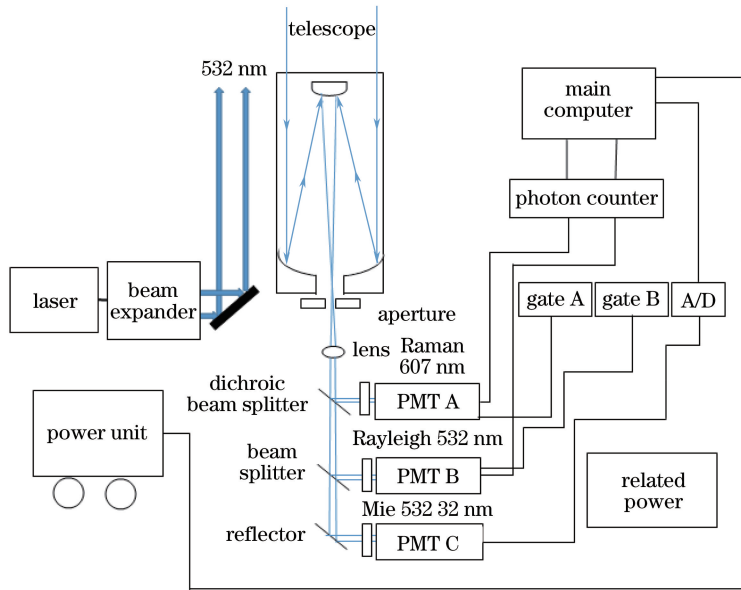


图1 实验观测系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of experimental observation system

RRML 系统主要包含发射单元、接收单元及数据存储单元 3 个部分,发射单元(SureliteII 型激光器及扩束器等)和接收单元(接收望远镜等)放置在一个水平工作台上,实验室内保持恒温,系统参数见表 1。激光雷达发射波长为 532 nm,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,不同波长的信号经过分色镜分离开,607 nm 的后向散射光被全部反射到拉曼通道,532 nm 的后向散射光通过分束镜,一部分光被反射到瑞利通道,一部分光被米氏通道接收。拉曼和瑞利通道设置了不同的门控,并且延迟可调。由于拉曼与瑞利高层信号都很微弱,需要使用高灵敏度、高量子效率的 R4632 型光电倍增管(PMT)来提高信噪比,并且结合光子计数卡进行检测。然而米氏通道接收到的后向散射信号通过 H5783 型光电倍增管后直接由 PCI29812 型模数转换

表 1 RRML 系统参数

Table 1 System parameters of RRML

Parameter	Value
Wavelength /nm	532
Pulse energy /mJ	about 280
Emission repetition frequency /Hz	20
Pulse length / μ s	180/200/320
Telescope diameter /mm	400
Divergence angle /mrad	0,6
Telescope field angle /mrad	2,5
Filter center wavelength /nm	532/607
Rayleigh channel range resolution /m	30/150
Raman channel range resolution /m	30/150
Mie channel range resolution /m	30

(A/D)数据采集卡采集。采集到的所有数据存储于计算机。拉曼通道与瑞利通道的光子计数卡可调通道的垂直分辨率,垂直分辨率有 150 m 和 30 m 两

种;米氏通道的垂直分辨率为 30 m,实验数据的空间垂直分辨率是 30 m。在实际测量过程中,只能分别对高低空进行测量,一般以 10000 脉冲积分作为一个数据文件,5 次积分为一组。值得注意的是,RRML 系统的激光发射和接收分置,属于旁轴体系,近点接收会产生误差,需要用几何重叠因子进行订正。

2.2 反演方法

氮拉曼激光雷达接收后向散射信号的方程为

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

式中: $P_{\lambda_R}(z)$ 为距离 z 处拉曼波长为 λ_R 的接收功率; $O(z)$ 为雷达接收视场角重叠函数; K 为包含了所有与距离无关的系统参数; $N_N(z)$ 为氮气分子在距离 z 处的数密度; $\frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega}$ 为与距离无关的角微分拉曼后向散射截面; $d\Omega$ 为单位面积微分; $\alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z)$ 和 $\alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)$ 分别是弹性后向散射激光雷达波长 λ_0 和拉曼波长 λ_R 的大气分子消光系数; $\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(z)$ 和 $\alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(z)$ 分别是弹性后向散射激光雷达波长 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,可以得到:

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

式中假设气溶胶粒子消光系数与 λ^{-k} 成正比,所以 $\frac{\alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(z)}{\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(z)} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_R}\right)^k$,其中 k 为波长指数,对直径与测量波长相当的气溶胶粒子,可以假设 $k=1$ 。(2)式中的 $\alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z)$ 和 $\alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)$ 可以通过标准大气模式得到:

$$\alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z) = 8\pi/3 \times 5.45 \times N_{\text{mol}}(z) \times \left(\frac{550}{\lambda_0}\right)^4 \times 10^{-38}, \quad (3)$$

$$\alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z) = 8\pi/3 \times 5.45 \times N_{\text{mol}}(z) \times \left(\frac{550}{\lambda_R}\right)^4 \times 10^{-38}, \quad (4)$$

(3)式和(4)式中的 $N_{\text{mol}}(z)$ 为距离 z 处的大气分子数密度。

3 资料处理及分析计算

3.1 小波去噪并进行雷达资料处理

3.1.1 小波去噪分析

在 Matlab 环境下进行小波去噪,选择合适的阈值缩减方式、自适应阈值以及小波基函数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,分别为软阈值化和硬阈值化。

软阈值化的数学表达式为

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

硬阈值化的数学表达式为

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

式中: W 为分解下来的小波系数; W_η 为阈值化后的小波系数; η 为阈值。

自适应阈值的选择有 4 种:1)固定式阈值(sqtwolog);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)式可以求取气溶胶消光系数廓线,针对拉曼散射激光雷达回波弱信号,在小波去噪之前,需要对回波信号进行背景噪声扣除,平流层信号容易受背景噪声的影响,噪声功率 P_n 针对不同时刻的回波信号有所改变,需要视真实情况而定。大气分子消光系数廓线变化比较稳定^[17-18],根据(3)式和(4)式可以分别计算波长 λ_0 和 λ_R 的大气分子消光系数廓线。其中波长 $\lambda_0=532$ nm,波长 $\lambda_R=607$ nm,大气分子数密度廓线可以根据 1976 年美国标准大气模型计算得到。(2)式中对气溶胶消光系数影响较大的就是 $\frac{d}{dz} \left\{ \ln \frac{N_N(z)}{[P_{\lambda_R}(z) - P_n] z^2} \right\}$,所以对此项将采取如下处理:根据 1976 年美国标准大气模型,得到氮气数密度 $N_N(z)$ 的数学表达式^[19-21]; $[P_{\lambda_R}(z) - P_n] z^2$ 有两个变量,分别为 $P_{\lambda_R}(z)$ 和 z^2 ,因此用小波对 $[P_{\lambda_R}(z) - P_n] z^2$ 进行整体去噪处理,该处理可以避免单独对 $[P_{\lambda_R}(z) - P_n]$ 进行小波去噪时, z^2 对信号的扰动影响。详细说明参考文献[12]。

在反演平流层拉曼散射激光雷达信号数据之前,需要对原始信号进行去噪处理,因为激光器发射的激光到达平流层的能量很小,容易受到噪声干扰,

接收到的回波信号不能直接用于反演平流层气溶胶消光系数廓线。利用 Matlab 对平流层拉曼散射激光雷达信号数据进行小波去噪,得到的平滑数据可以用于反演气溶胶消光系数廓线。

取一段平流层拉曼散射激光雷达回波信号数据进行小波软硬阈值方式和 4 种自适应阈值对比处理。研究分析发现:硬阈值不一定比软阈值处理的信号平滑,但是硬阈值处理的信号保留了更多真实信号的特征,4 种自适应阈值中固定式阈值对信号去噪效果更好。图 2 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都采用 sqtwolog 固定式,小波基函数都采用 sym17。

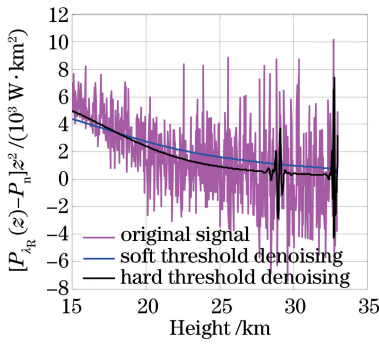


图 2 2011-12-08T20:45:03 的激光雷达距离修正信号数据的软硬阈值小波去噪效果对比图
Fig. 2 Comparison of wavelet denoising effect between soft and hard thresholds of lidar range correction signal data at 20:45:03 on December 8, 2011

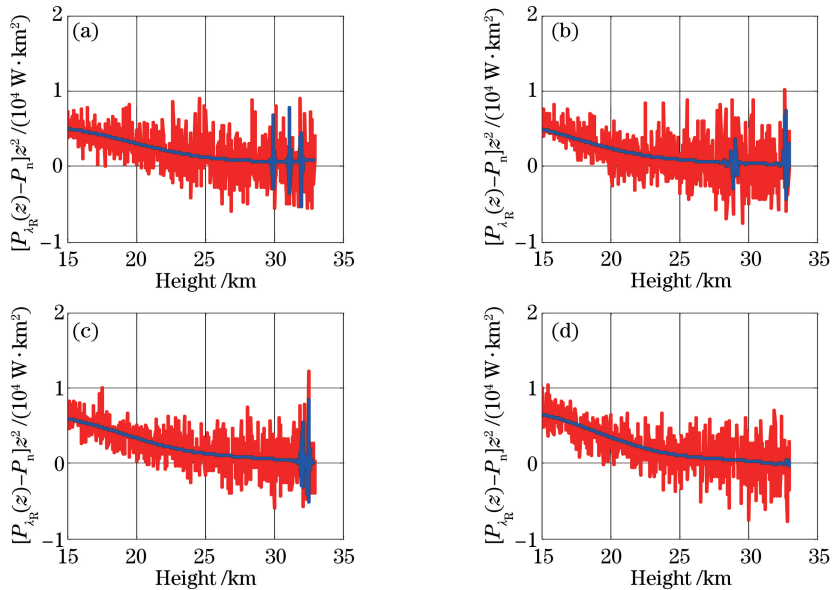


图 4 拉曼散射激光雷达信号小波去噪效果对比图。(a) 2011-12-08T20:11:13; (b) 2011-12-08T20:45:03; (c) 2011-12-09T19:30:06; (d) 2011-12-09T19:55:46

Fig. 4 Comparison of wavelet denoising effect of Raman scattering lidar signal. (a) At 20:11:13 on December 8, 2011; (b) at 20:45:03 on December 8, 2011; (c) at 19:30:06 on December 9, 2011; (d) at 19:55:46 on December 9, 2011

图 3 比较了 4 种自适应阈值处理信号的效果。4 种方案都采用硬阈值方式处理,小波基函数都采用 sym17。

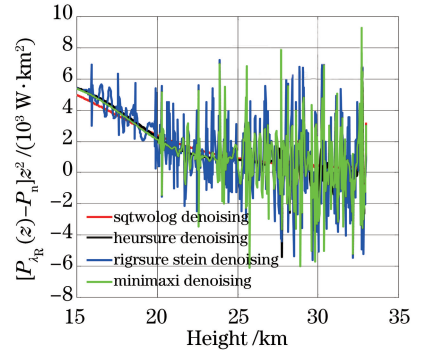


图 3 2011-12-08T20:45:03 的激光雷达距离修正信号数据的不同阈值小波去噪效果对比图
Fig. 3 Comparison of wavelet denoising effect of lidar range correction signal data with different thresholds at 20:45:03 on December 8, 2011

图 4 为 4 个时刻的小波去噪效果对比图,每张图都有相对应的小波基函数及均采用硬阈值方式的固定式阈值小波函数降噪。图 4 中的红色线代表未过去噪处理的雷达距离修正信号,不能直接用于反演气溶胶消光系数廓线,蓝色线是经过小波去噪处理的雷达距离修正信号,数据没有变得完全平滑,但是绝大部分信号数据可以用于反演。图 4 中进行去噪处理的距离修正信号数据是 15~33 km 之间的平流层气溶胶数据,图 4(a)~(d)去掉的背景噪

声分别是 11.2, 14.5, 8.6, 10.2 W, 采用的小波基函数分别为 sym12、sym17、sym16、sym16。

从图 4 的 4 张图可以发现, 经过小波去噪处理后得到的拉曼散射激光雷达距离修正信号在高度较低和较高处去噪效果较差, 因此, 4 张图全部取 20~27 km 的平滑信号数据用于反演大气气溶胶消光系数廓线。

3.2 反演结果

图 5(a) 为 2011-12-08T20:11:13 的拉曼散射激光雷达平流层距离修正信号, 图 5(b) 为图 5(a) 对应

时刻的气溶胶消光系数廓线, 其中红色线代表未经过小波去噪处理的信号, 蓝色线代表过去噪处理的信号。图 5(c) 为 2011-12-08T20:45:03 的拉曼散射激光雷达平流层距离修正信号, 图 5(d) 为图 5(c) 对应时刻的气溶胶消光系数廓线。

图 6(a) 为 2011-12-09T19:30:06 的拉曼散射激光雷达平流层距离修正信号, 图 6(b) 为图 6(a) 对应时刻的气溶胶消光系数廓线; 图 6(c) 为 2011-12-09T19:55:46 的拉曼散射激光雷达平流层距离修正信号, 图 6(d) 为图 6(c) 对应时刻的气溶胶消光系数廓线。

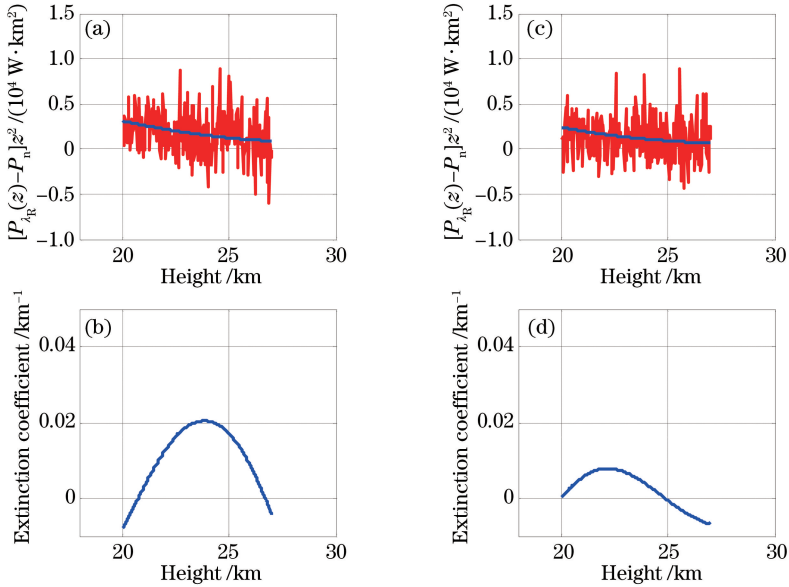


图 5 (a) 2011-12-08T20:11:13 拉曼散射激光雷达平流层去噪信号及 (b) 平流层气溶胶消光系数廓线; (c) 2011-12-08T20:45:03 拉曼散射激光雷达平流层去噪信号及 (d) 平流层气溶胶消光系数廓线

Fig. 5 (a) Denoising signal of Raman scattering lidar in stratosphere and (b) stratospheric aerosol extinction coefficient profile at 20:11:13 on December 8, 2011; (c) denoising signal of Raman scattering lidar in stratosphere and (d) stratospheric aerosol extinction coefficient profile at 20:45:03 on December 8, 2011

综合图 5 和图 6 可以发现, 平流层气溶胶消光系数廓线有很多相似特征, 在 20~25 km 范围内都

存在一个消光系数最大值, 整体廓线都随高度先增大后减小。因为(2)式中 P_n 取常数, 那么:

$$\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N_N(z)}{[P_{\lambda_R}(z) - P_n]z^2} \right] = \frac{d}{dz} [\ln N_N(z)] - \frac{P'_{\lambda_R}(z)}{P_{\lambda_R}(z) - P_n} - \frac{2}{z} = \frac{P_{\lambda_R}(z - \Delta z) - P_{\lambda_R}(z)}{[P_{\lambda_R}(z) - P_n]\Delta z} + \frac{d}{dz} [\ln N_N(z)] - \frac{2}{z}, \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式, 可以得到:

$$\alpha_{\lambda_0}^{\text{aer}}(z) = \frac{P_{\lambda_R}(z - \Delta z) - P_{\lambda_R}(z)}{[P_{\lambda_R}(z) - P_n]\Delta z} + \frac{d}{dz} [\ln N_N(z)] - \frac{2}{z} - \alpha_{\lambda_0}^{\text{mol}}(z) - \alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)}{1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_R} \right)^k}, \quad (8)$$

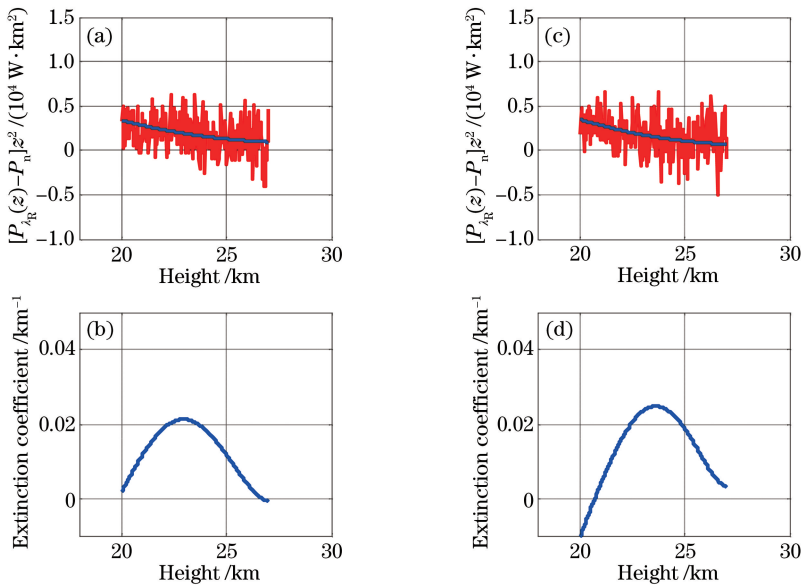


图 6 (a) 2011-12-09T19:30:06 拉曼散射激光雷达平流层去噪信号及(b)平流层气溶胶消光系数廓线；
(c) 2011-12-09T19:55:46 拉曼散射激光雷达平流层去噪信号及(d)平流层气溶胶消光系数廓线

Fig. 6 (a) Denoising signal of Raman scattering lidar in stratosphere and (b) stratospheric aerosol extinction coefficient profile at 19:30:06 on December 9, 2011; (c) denoising signal of Raman scattering lidar in stratosphere and (d) stratospheric aerosol extinction coefficient profile at 19:55:46 on December 9, 2011

式中： Δz 是相邻两个采样点之间的距离。(8)式中 $\frac{d}{dz}[\ln N_N(z)]$ 、 $\alpha_{\lambda_0}^{mol}(z)$ 与 $\alpha_{\lambda_R}^{mol}(z)$ 变化幅度小，其数值根据假设条件得到，各个高度的数值基本不变。从(8)式可以发现，激光能量衰减越大，即 $P_{\lambda_R}(z - \Delta z) - P_{\lambda_R}(z)$ 的值越大，这个值增大会造成大气消光系数数值增大。吴永华等^[3]使用 L625 激光雷达探测合肥地区平流层气溶胶，发现气溶胶消光系数在 18 km 附近达到最大值，即人们通常所说的气溶胶荣格层。但是，图 5 和图 6 平流层气溶胶消光系数峰值在 23 km 附近，这说明南京北郊的气溶胶荣格层在 23 km 附近，与合肥地区有一些差异。吕达仁等^[22]展示过 4 波长激光雷达探测平流层臭氧分布的个例，发现臭氧浓度最大值在 20~25 km 之间。臭氧在约 440~1180 nm 的可见和近红外区有一个弱吸收带，称为查普斯带，臭氧可以吸收实验系统发射的 532 nm 波长的激光和 607 nm 波长的拉曼后向散射光，因此认为臭氧层可能对拉曼散射激光雷达反演得到的平流层气溶胶消光系数廓线造成一些影响。

图 5(b)中气溶胶消光系数峰值在 0.02 km^{-1} 左右，图 5(d)中气溶胶消光系数峰值在 0.008 km^{-1} 左右，图 6(b)中气溶胶消光系数峰值在 0.02 km^{-1} 左右，图 6(d)中气溶胶消光系数峰值在 0.025 km^{-1} 左

右。图 5 和图 6 气溶胶消光系数峰值都比较小，然而从图 5(d)中可以发现，得到的气溶胶消光系数峰值偏小，是因为在湍流的作用下，大气中的气体成分与悬浮粒子迅速向周围扩散^[23]，因此可以认为气溶胶消光系数峰值偏小是大气湍流造成的。

4 结 论

基于拉曼散射的气溶胶探测激光雷达，能够探测平流层底部的气溶胶消光系数廓线。使用硬阈值方式的 sqtwolog 固定式阈值小波函数对南京北郊拉曼散射激光雷达的平流层大气气溶胶观测数据进行降噪，结合拉曼散射激光雷达的反演原理可以得到平流层大气气溶胶消光系数廓线。从 2011-12-08 与 2011-12-09 晚间平流层大气气溶胶消光系数廓线中发现，利用平流层大气气溶胶消光系数峰值可以大致确定气溶胶荣格层的高度，但是要深入了解平流层大气状况，需要更多平流层气溶胶观测数据作为支撑。

参 考 文 献

[1] Cai H K, Guo J C, Zhou R J, *et al.* The relation of stratospheric aerosols with trace gases and temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(6): 1159-1168.
蔡宏珂, 郭静超, 周任君, 等. 平流层气溶胶与多种

- 微量气体以及温度的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1159-1168.
- [2] Xu Qun. A largest event of stratospheric aerosols in present century[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1993, 13(3): 327-336.
徐群. 本世纪最大的一次平流层气溶胶事件[J]. 气象科学, 1993, 13(3):327-336.
- [3] Wu Y H, Hu H L, Zhou J, *et al.* Measurements of stratosphere aerosol with 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] Iwasaka Y N, Fukunishi H, Liu Z G. Simultaneous measurement of stratospheric aerosol layers based on a multi-wavelength laser radar [J]. Meteorological Science and Technology, 1985(4): 77-79.
岩坂泰信, 福西浩, 刘志刚. 用多波长激光雷达同时测量平流层气溶胶层[J]. 气象科技, 1985(4): 77-79.
- [5] Wang Y Z, Zhang Y C, Chen S Y, *et al.* New method for aerosol extinction coefficient inversion by using a rotational Raman-Mie scattering lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(s1): s100512.
王玉诏, 张寅超, 陈思颖, 等. 转动拉曼米氏散射激光雷达反演气溶胶消光系数[J]. 光学学报, 2010, 30(s1): s100512.
- [6] Bo G Y, Liu B, Zhong Z Q, *et al.* Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 19-25.
伯广宇, 刘博, 钟志庆, 等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 19-25.
- [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] Hee W S, Lim H S, Jafri M Z M, *et al.* Vertical profiling of aerosol types observed across monsoon seasons with a Raman lidar in Penang island, Malaysia [J]. Aerosol & Air Quality Research, 2016, 16(11): 2843-2854.
- [10] Su J, Wu Y H, McCormick M P, *et al.* Improved method to retrieve aerosol optical properties from combined elastic backscatter and Raman lidar data [J]. Applied Physics B, 2014, 116(1): 61-67.
- [11] 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.
- [12] Shen J, Cao N W. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610003.
沈吉, 曹念文. 米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610003.
- [13] Xie J L, Du J, Yuan X P. Research on wavelet denoising method based on 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.
- [14] Du H F, Cong S. The study on wavelet de-noising 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.
- [15] Wang X L. Wavelet denoising method analysis and Matlab simulation[J]. Industrial Control Computer, 2008, 21(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, 21(6): 55-56.
- [16] Lin D S. Research on wavelet thresholding de-noising method based on Matlab [J]. Computer Knowledge and Technology, 2013, 9(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, 9(11): 2662-2663.
- [17] Chi R L, Wu D C, Liu B, *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.
- [18] Hong G L, Zhang Y C, Hu S X. Near infrared micro pulse lidar of profiling atmospheric CO₂ [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(5): 384-388.
洪光烈, 张寅超, 胡顺星. 探测低空大气 CO₂ 浓度分布的近红外微脉冲激光雷达[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(5): 384-388.
- [19] Chen J B, Zhu X, Wang K J, *et al.* Theoretical predictions for components of atmosphere convection layer varying by height above sea level[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(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, 30(4): 60-65.
- [20] Xue D T. 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.

- [21] Yang B W. Formulization of standard atmospheric parameters [J]. Journal of Astronautics, 1983, 4(1): 83-86.

杨炳尉. 标准大气参数的公式表示 [J]. 宇航学报, 1983, 4(1): 83-86.

- [22] Lü D R, Chen H B. Advances in middle atmosphere physics research [J]. Chinese Journal of Atmospheric

Sciences, 2003, 27(4): 750-769.

吕达仁, 陈洪滨. 平流层和高层大气研究的进展 [J]. 大气科学, 2003, 27(4): 750-769.

- [23] Hu N, Zhang Z L, Zhong J Q, *et al.* Advances in stratosphere-troposphere exchange research [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(4): 375-385.

胡宁, 张朝林, 仲跻芹, 等. 大气对流层平流层交换 (STE) 研究进展 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(4): 375-385.