

Rayleigh-Raman-Mie 激光雷达探测南京北郊 对流层气溶胶光学特性

虞历尧, 曹念文*, 沈吉

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 利用中国气象局南京综合观测基地的 Rayleigh-Raman-Mie 激光雷达, 对南京北郊对流层气溶胶进行观测分析。通过软阈值滤波的小波去噪方法对波长为 607 nm 的 Raman 回波信号进行平滑, 利用激光雷达 Raman 通道的实验数据反演对流层高空的气溶胶消光系数, 结合波长为 532 nm 的 Mie 散射信号反演对流层高空气溶胶后向散射系数和激光雷达比。实验结果表明: 软阈值滤波的小波去噪方法可以很好地去除噪声信号, 提高反演结果的准确性; 在晴空的天气条件下, 南京北郊高空气溶胶消光系数的变化范围为 $0.03 \sim 0.07 \text{ km}^{-1}$, 后向散射系数变化范围为 $0.011 \sim 0.024 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 激光雷达比的变化范围为 $22 \sim 52 \text{ sr}$, 表明南京北郊高空存在一定含量的气溶胶; 实验期间测多次测得卷云, 卷云的激光雷达比为 $17 \text{ sr} \pm 10 \text{ sr}$ 。

关键词 大气光学; 气溶胶; 消光系数; 后向散射系数; 激光雷达比; 小波去噪

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110102

Detection of Tropospheric Aerosol Optical Properties by Rayleigh-Raman-Mie Lidar in the Northern Suburb of Nanjing

Yu Liyao, Cao Nianwen*, Shen Ji

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

Abstract The tropospheric aerosols in the northern suburb of Nanjing is observed and analyzed with the Rayleigh-Raman-Mie lidar in Nanjing comprehensive observation base of the China Meteorological Administration. The Raman scattering signals with the wavelength of 607 nm are smoothed by the wavelet denoising method on the basis of soft threshold filtering. The extinction coefficient of upper tropospheric aerosols is retrieved based on the data from Raman channel of the lidar. The backscattering coefficient and the lidar ratio of upper tropospheric aerosols are retrieved with the Mie scattering signal with the wavelength of 532 nm. The experimental results show that the wavelet denoising method on the basis of soft threshold filtering can remove the signal noise well and improve the accuracy of the retrieval results. In sunny and cloud-free day, the extinction coefficient of upper tropospheric aerosols is from 0.03 km^{-1} to 0.07 km^{-1} , the aerosol backscattering coefficient is from $0.011 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ to $0.024 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, and the lidar ratio is from 22 sr to 52 sr . It is indicated that there are still some aerosol particles in upper tropospheric of the northern suburb of Nanjing. Cirrus clouds have been measured many times during the experiment. The lidar ratio cirrus clouds is $17 \text{ sr} \pm 10 \text{ sr}$.

Key words atmospheric optics; aerosol; extinction coefficient; backscattering coefficient; lidar ratio; wavelet denoising

OCIS codes 010.1100; 010.1310; 010.1350; 010.1615; 010.3640

1 引言

大气气溶胶是由存在于大气中直径在几纳米到

几十微米之间的固体或液体颗粒物组成的体系。大气气溶胶能够通过影响辐射传输来影响地球的辐射收支平衡^[1]。作为云凝结核的气溶胶粒子不但会影

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-05-22; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0209603)、国家自然科学基金(41375044/D0503)

* E-mail: nwcaomail@163.com

响云的生成,而且还会影响云的降水特性^[2-3]。另外,大气气溶胶也会通过影响大气环境来影响人们的身体健康^[4]。因此气溶胶已成为大气科学和环境检测等领域的研究热点^[5],而激光雷达是一种可以用来探测大气气溶胶的有效手段。

激光雷达利用的是主动遥感技术,有很高的时空分辨率,可以进行连续监测,这是其他探测仪器所不具备的^[6]。对于 Mie 散射激光雷达,可以用 Klett 法或者 Fernald 法反演大气气溶胶光学参数,宋秀瑜等^[7]利用 Mie 散射激光雷达数据对 Klett 与 Fernald 两种方法的计算结果进行了对比,发现在气溶胶含量低的区域,两种方法反演结果有差别,而在气溶胶含量较大区域,两种方法反演结果几乎一样。但是利用 Klett 法或者 Fernald 法反演时需要假定参考点的标定值和激光雷达比,而激光雷达比又和气溶胶粒子的化学成分、粒子的大小以及大气折射率有关,是随着时空的变化而变化的^[8]。所以利用 Mie 散射激光雷达所反演的气溶胶光学参数可靠性偏低。而 Rayleigh-Raman-Mie 激光雷达(RRML)不但能够接收 Mie 散射回波信号,而且还能同时接收 Raman 散射回波信号,在不假设激光雷达比的情况下可以直接反演出气溶胶的消光系数和后向散射系数,因此可以提高反演结果的准确性。目前 RRML 已经渐渐地用于大气气溶胶光学特性的探测中。Su 等^[9]结合 Raman-Mie 散射激光雷达和多波长激光雷达,提出了一种多波长激光雷达比的数据反演方法。施建中等^[10]利用 RRML 的 Mie 通道

回波信号对南京北郊气溶胶进行观测,分析了南京北郊气溶胶光学厚度的变化特征。沈吉等^[11]利用 RRML 反演了平流层大气气溶胶消光系数廓线,并且分析了平流层大气气溶胶消光系数的变化特征。曹念文等^[12]利用 RRML 对南京北郊气溶胶进行了常规观测,分析了气溶胶的光学特性随边界值变化的特点,提出了一种新的边界值确定方法。孙海波等^[13]利用 RRML 及微脉冲激光雷达,结合 CE-318 太阳光度计观测数据对气溶胶消光波长指数 k 在不同天气条件下的取值进行了分析。但是国内利用 RRML 探测气溶胶的激光雷达比,详细分析气溶胶激光雷达比数据的变化特征及原因的研究甚少。

本文利用 RRML 的 Mie 通道和 Raman 通道的雷达数据联合反演对流层气溶胶的光学特性。由于 Raman 信号本身强度较弱,在原始信号中又有大量的噪声信号,因此不适合用于直接反演气溶胶的光学特性^[14],通过软阈值滤波的小波去噪方法对拉曼散射信号进行平滑,可以提高反演结果的准确性。本文用去除噪声后的 Raman 散射回波信号反演对流层高空的气溶胶消光系数,同时结合 Mie 散射信号反演对流层高空气溶胶后向散射系数和激光雷达比。

2 实验观测系统与反演方法

2.1 实验观测系统

实验所使用的数据由 RRML 采集,该雷达安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。实验观测系统如图 1 所示。

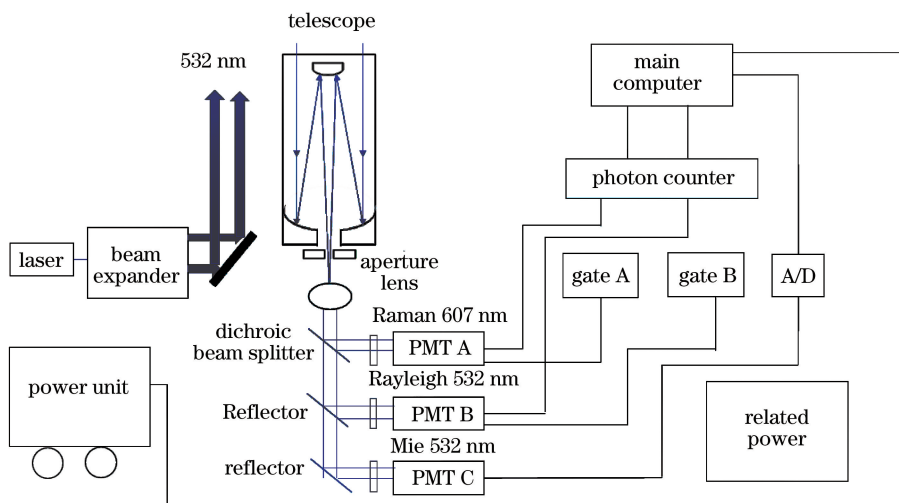


图 1 Rayleigh-Raman-Mie 激光雷达结构示意图

Fig. 1 Schematic of the Rayleigh-Raman-Mie lidar

该激光雷达系统激光发射波长为 532 nm, 频率为 10 Hz, 望远镜直径为 50 cm. 激光光束在传播过程中会与大气分子和气溶胶粒子产生相互作用, 一部分的激光会反射回来由望远镜接收, 通过会聚透镜后进入信号采集通道. 整个通道分为三个部分, 一个为 Raman 散射通道, 波长为 607 nm, 该通道工作时间由门控信号控制; 一个为低空 Mie 散射通道, 该通道为光电倍增管(PMT); 最后一个为高空 Rayleigh 通道, 该通道由门控信号控制, 由于高空的 Rayleigh 信号相对较弱, 为了使高空的 Rayleigh 弱信号不受低空的 Mie 散射强信号干扰, 高空 Rayleigh 信号相对低空 Mie 信号在时间上要延迟一些^[12].

2.2 反演方法

2.2.1 消光系数

Raman 激光雷达方程可表示为

$$P(\lambda_R, z) = C_R \frac{Y(z)}{z^2} N(z) \sigma_{N_2} \times \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_m(\lambda_L, z') + \alpha_m(\lambda_R, z')] dz'\right\} \times \exp\left\{-\int_0^z [\alpha_a(\lambda_L, z') + \alpha_a(\lambda_R, z')] dz'\right\}, \quad (1)$$

式中: $P(\lambda_R, z)$ 为雷达所接收到的 Raman 通道回波信号; λ_R 为经过氮分子 Raman 散射后的波长 (607 nm); λ_L 为激光波长 (532 nm); C_R 为 Raman 通道的雷达常数; $Y(z)$ 为雷达接收视场角内的重叠函数; $N(z)$ 为高度 z 处的氮气分子数密度; σ_{N_2} 为氮气分子后向散射截面; $\alpha_m(\lambda_L, z)$ 和 $\alpha_a(\lambda_L, z)$ 分别为高度 z 处的大气分子和大气气溶胶在波长 λ_L 上的消光系数; $\alpha_m(\lambda_R, z)$ 和 $\alpha_a(\lambda_R, z)$ 分别为高度 z 处的大气分子和大气气溶胶在波长 λ_R 上的消光系数.

Mie 散射激光雷达方程可表示为

$$P(\lambda_L, z) = C_M \frac{Y(z)}{z^2} [\beta_m(\lambda_L, z) + \beta_a(\lambda_L, z)] \times \exp\left\{-2\int_0^z [\alpha_m(\lambda_L, z') + \alpha_a(\lambda_L, z')] dz'\right\}, \quad (2)$$

式中: $P(\lambda_L, z)$ 为雷达接收到的 Mie 通道回波信号; C_M 为 Mie 通道的雷达常数; $\beta_m(\lambda_L, z)$ 为高度 z 处的大气分子在波长 λ_L 上的后向散射系数; $\beta_a(\lambda_L, z)$ 为高度 z 处的大气气溶胶在波长 λ_L 上的后向散射系数.

由(1)式可以得到气溶胶消光系数为

$$\alpha_a(\lambda_L, z) = \frac{d/dz \left[\ln \frac{N(z)}{P(\lambda_R, z) z^2} \right] - \alpha_m(\lambda_R, z) - \alpha_m(\lambda_L, z)}{1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_R} \right)^k}, \quad (3)$$

式中: k 是大气气溶胶消光波长指数, 对流层 k 值一般假设为 1. 理论分析和数值计算表明, 假设的波长指数对计算得到的气溶胶消光系数的影响很小^[7]. (3)式中氮气分子数密度和大气分子消光系数 $\alpha_m(\lambda_R, z)$ 、 $\alpha_m(\lambda_L, z)$ 可以由美国标准大气模式计算得到.

2.2.2 后向散射系数

结合(1)式和(2)式, 可以得到气溶胶后向散射系数:

$$\beta_a(\lambda_L, z) = -\beta_m(\lambda_L, z) + [\beta_a(\lambda_L, z_c) + \beta_m(\lambda_L, z_c)] \times \frac{P(\lambda_R, z_c) P(\lambda_L, z) N(z)}{P(\lambda_L, z_c) P(\lambda_R, z) N(z_c)} \times \exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda_R, z') + \alpha_m(\lambda_R, z')] dz'\right\} \frac{\exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda_L, z') + \alpha_m(\lambda_L, z')] dz'\right\}}{\exp\left\{-\int_{z_c}^z [\alpha_a(\lambda_L, z') + \alpha_m(\lambda_L, z')] dz'\right\}}, \quad (4)$$

式中: z_c 表示标定高度; $\beta_a(\lambda_L, z_c)$ 和 $\beta_m(\lambda_L, z_c)$ 分别表示大气气溶胶和大气分子在高度为 z_c 、波长为

λ_L 处的后向散射系数.

2.2.3 激光雷达比

利用所求得的气溶胶消光系数和后向散射系数可求得激光雷达比:

$$S(z) = \frac{\alpha_a(\lambda_L, z)}{\beta_a(\lambda_L, z)}. \quad (5)$$

3 数据处理及典型观测结果分析

3.1 数据处理

本文大气气溶胶的激光雷达观测数据来自中国气象局-南京综合观测实验基地南京信息工程大学, 选取 2011 年 12 月 9 日探测气溶胶的激光雷达数据进行处理. 对距离修正信号进行去噪处理, 反演结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, 原始信号在 2 km 以下的数据为零, 这是因为 Raman 回波本身就是弱信号, 雷达最终得到的 Raman 信号是通过光电倍增管放大后的回波信号, 其中也包括了强的背景光噪声信

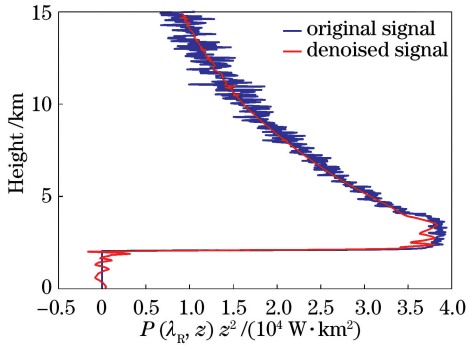


图2 拉曼散射信号小波去噪效果对比图

Fig. 2 Wavelet de-noising effect of Raman scattering signal
号,为防止地面强的背景光噪声信号损坏光子计数卡,激光雷达设置了一个门控高度,约2 km。

由(3)式可知 $\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{N(z)}{P(\lambda_R, z) z^2} \right]$ 这一项对于求

解消光系数有很大的影响,从图中可以看出,经过距离校正后的 Raman 信号有很多的波动,这会影响到气溶胶消光系数的反演。这些波动可能是由于 Raman 信号本身存在变化,但更主要的应该是由于相对较弱的 Raman 信号中夹杂了许多噪声信号,造成了 Raman 信号的波动。为了能够更好地反演气溶胶消光系数和后向散射系数,需要对原始 Raman 信号进行去噪处理,而小波去噪可以很好地提取真实信号,改善反演结果,如图2所示。从图2中可以发现,小波去噪可以很好地平滑距离校正信号,但是对于低空信号平滑效果不是很好,出现了明显的失真现象。所以本文选取4 km以上的平滑信号来反演气溶胶消光系数和后向散射系数,这样可以有效地减小低空失真信号对数据反演结果的准确性的影响。

小波去噪的具体步骤为:1) 确定小波基类型和信号分解的层次,对原始信号进行小波分解;2) 对小波分解高频系数的阈值进行量化处理;3) 去除信号中的系统噪声;4) 将小波分解的最底层低频系数和各层高频系数进行小波重构^[15]。对于阈值处理的方法可以分为硬阈值法和软阈值法,软阈值法和硬阈值法的选择公式分别为^[16]

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

$$W_{\eta\text{-hard}} = \begin{cases} W, & |W| \geq \eta \\ 0, & |W| < \eta \end{cases}, \quad (7)$$

式中: W 为分解得到的小波系数; η 为阈值。从文献^[16]中可以发现,软阈值去噪效果更加平滑,可以得到更好的反演结果,能够适用于不同的信号与噪声,所以本文选择软阈值滤波。

3.2 反演结果分析

为了深入了解南京北郊对流层的气溶胶光学特性,选取2011年11月24日,12月8日及12月9日晚的激光雷达观测数据,分别反演了气溶胶的消光系数、后向散射系数和激光雷达比。

图3为11月24日19:40、19:48、20:48和21:05四个时刻的气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比变化图。从图中可以发现,气溶胶消光系数在4~5.7 km处略有波动,其数值在0.016~0.11 km⁻¹之间;激光雷达比在4~5.7 km处波动幅度较大,其数值在10~150 sr之间。这表明在4~5.7 km处存在一定含量的气溶胶粒子,且气溶胶粒子分布不均匀。在5.7~7 km高度处,消光系数在四个时刻均出现了最大值,依次分别为0.38,0.18,0.22,0.14 km⁻¹。相应地,后向散射系数也在相同高度处出现最大值,分别为0.02,0.025,0.013,0.005 km⁻¹·sr⁻¹。而激光雷达比却是低值,分别为19,7.2,17,28 sr。由于消光系数和后向散射系数出现峰值的高度较高,可以排除在5.7~7 km之间存在气溶胶团的可能,且已有研究表明,卷云雾粒子的激光雷达比很小,一般都小于30 sr^[17]。冬季南京北郊又常伴有卷云存在,因此可以认为在5.7~7 km之间存在卷云。

图4为12月8日19:37、19:54、20:11和20:45四个时刻的气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比变化图。从消光系数图中可以发现19:37和19:54在4.2~5 km高度处有一个气溶胶层,气溶胶激光雷达比在30~60 sr之间,均值为40 sr。在20:11高空5~5.8 km高度处有一个气溶胶层,气溶胶激光雷达比在40~78 sr之间,均值为57 sr。在20:45,4~6 km高度处气溶胶消光系数和激光雷达比都比较稳定,均值分别为0.06 km⁻¹和42 sr,都高于大气模型,表明此时在4~6 km高度处仍存在一定含量的气溶胶,且气溶胶分布均匀。在6~7 km之间,与图3的分析相似,气溶胶消光系数和后向散射系数出现了峰值,激光雷达比在相同高度处为低值,均值为17 sr,表明12月8日19:37至20:45,南京北郊高空6~7 km之间存在卷云,而在7~8 km之间,可以发现20:11至20:45期间,7.5 km左右处有卷云存在。从图中也可以明显地发现,随着时间的推移,气溶胶的光学特性随高度的变化较快,查询当时的天气条件发现,南京浦口地区在12月8号盛行北风,风速在5~6级。因此这个时间段内所测得的气溶胶光学特性随时间变化快是与当时的天气条件吻合的。

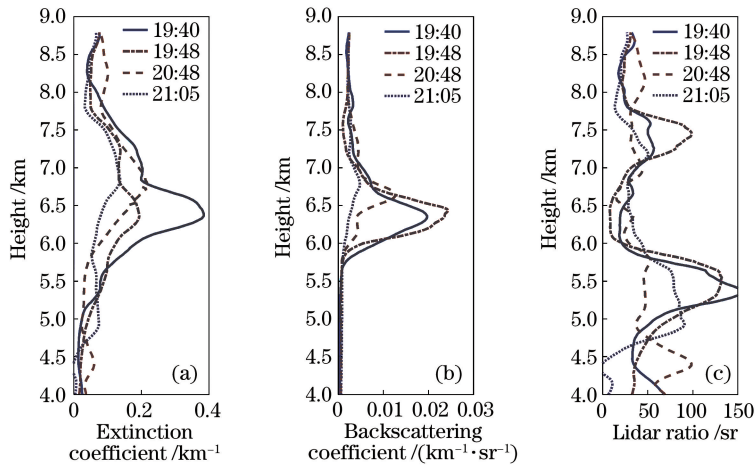


图3 2011年11月24日19:40至21:05四个时刻的气溶胶光学特性。(a)消光系数;(b)后向散射系数;(c)雷达比

Fig. 3 Aerosol optical properties of the four moments from 19:40 to 21:05 on November 24, 2011.

(a) Extinction coefficient; (b) backscattering coefficient; (c) lidar ratio

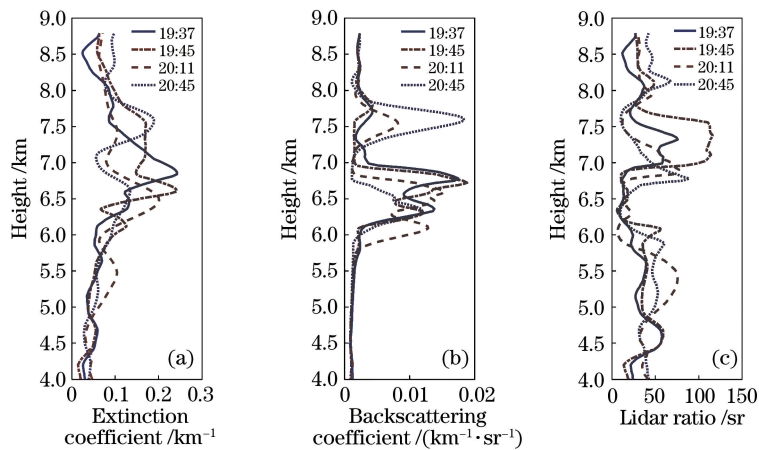


图4 2011年12月8日19:37至20:45四个时刻的气溶胶光学特性。(a)消光系数;(b)后向散射系数;(c)雷达比

Fig. 4 Aerosol optical properties of the four moments from 19:37 to 20:45 on December 8, 2011.

(a) Extinction coefficient; (b) backscattering coefficient; (c) lidar ratio

图5为12月9日19:22、19:30、19:38和19:46四个时刻的气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比变化图。从图中可以看出前三个时刻在4~8.7 km之间气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比均比较稳定,变化幅度小,气溶胶消光系数的变化范围为 $0.03\sim 0.07\text{ km}^{-1}$,后向散射系数变化范围为 $0.011\sim 0.024\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$,激光雷达比的变化范围为 $22\sim 52\text{ sr}$,表明此范围内气溶胶含量基本稳定,但由于消光系数和激光雷达比的数值均高于大气模型,所以高空仍存在少量气溶胶。而在19:46可以发现,气溶胶消光系数和后向散射系数在8.2 km左右出现了极大值分别为 0.07 km^{-1} 、 $0.005\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$,在相同高度处激光雷达比为低值 14 sr ,与图3的分析相似,表明此时在8.2 km左右处有少量卷云存在。

图6为12月9日20:55、21:04、21:12和21:29四个时刻的气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比变化图。从图中可以发现20:55在4~7 km之间,气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比变化比较小,平均值分别为 0.05 km^{-1} 、 $0.0014\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 、 36 sr ,大于大气模型,表明4~7 km之间存在一定含量的气溶胶。在7.7 km左右处气溶胶消光系数和后向散射系数出现了极大值,分别为 0.07 km^{-1} 、 $0.01\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$,激光雷达比在相同高度处出现了低值为 7 sr ,与图3的分析相似,表明此时在7.7 km左右处有少量卷云存在。在21:04,21:12和21:29这三个时刻可以发现,4.3 km处消光系数和后向散射系数均出现了一个峰值,而激光雷达比在4.3 km处为低值,7 sr,由此认为此时在南京北郊上空4.3 km左右有云出现,云的

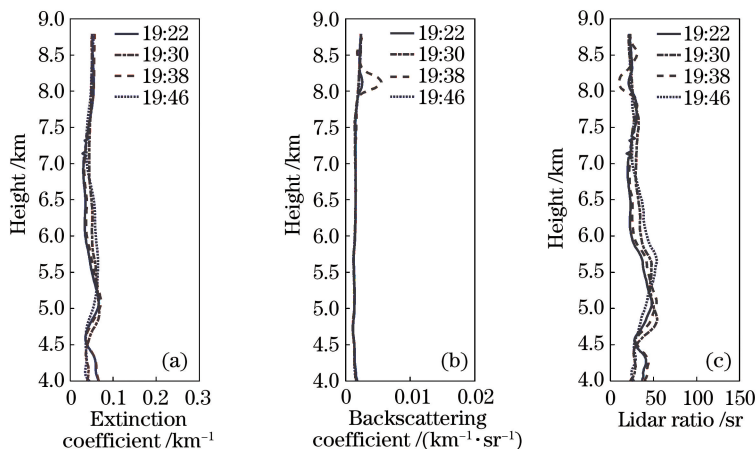


图 5 2011 年 12 月 9 日 19:22 至 19:46 四个时刻的气溶胶光学特性。(a)消光系数;(b)后向散射系数;(c)雷达比

Fig. 5 Aerosol optical properties of the four moments from 19:24 to 20:46 on December 9, 2011.

(a) Extinction coefficient; (b) backscattering coefficient; (c) lidar ratio

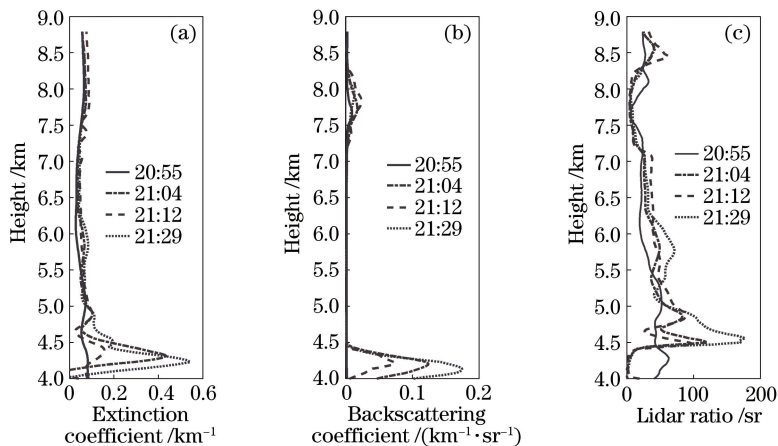


图 6 2011 年 12 月 9 日 20:55 至 21:29 四个时刻的气溶胶光学特性。(a)消光系数;(b)后向散射系数;(c)雷达比

Fig. 6 Aerosol optical properties of the four moments from 20:55 to 21:29 on December 9, 2011.

(a) Extinction coefficient; (b) backscattering coefficient; (c) lidar ratio

种类有待进一步研究。在 20:55 至 21:29 内, 4.3 km 左右处的消光系数和后向散射系数随着时间的推移慢慢地变大, 表明 4.3 km 处的云雾粒子在不断堆积, 且可以看出云层出现的时间段为 20:55 至 21:04。后三个时刻在 7.7 km 左右处的气溶胶光学特性与 20:55 相比无明显变化, 表明这三个时刻在 7.7 km 高度处仍有少量卷云存在。

结合图 3、图 4、图 5 和图 6 可以发现, 当有云出现时, 在同一高度处气溶胶消光系数、后向散射系数会出现较大的大值, 而激光雷达比的值是一个低值, 但是激光雷达比却在更高一点的距离处出现大值, 出现这种情况的原因可能是与凝结成云雾粒子的气溶胶的大小、形状及物理特性有关, 这有待于更进一步的研究。同时也可以发现, 在无云时南京北郊上空的气溶胶消光系数, 后向散射系数及激光雷达比

均高于大气模型, 表明人类的生产生活对南京北郊高空的气溶胶造成了一定的影响。

4 结 论

基于 RRML 可以较为准确地测量出气溶胶消光系数、后向散射系数和激光雷达比, 本文简单地介绍了位于中国国家气象局-南京综合观测实验基地南京信息工程大学的 RRML 系统及相关数据处理方法, 利用激光雷达所采集到的历史资料作了相关分析讨论, 得出以下结论:

1) 由于雷达自身硬件设备的限制, 加上拉曼信号本身较为微弱, 噪声使得反演结果出现很大波动, 软阈值滤波的小波去噪方法可以很好地去掉噪声信号, 提高反演结果的准确性。

2) RRML 在不假设激光雷达比的情况下可以

直接反演出气溶胶的消光系数、后向散射系数和激光雷达比,能够大致识别气溶胶种类,实验期间卷云的激光雷达比为 $17 \text{ sr} \pm 10 \text{ sr}$ 。

3) 南京北郊地区人类的生产生活对高空气溶胶的分布造成了一定的影响。在 $4 \sim 8.7 \text{ km}$ 之间的无云区域,实验所测得的气溶胶消光系数、后向散射系数及激光雷达比均高于大气模型,表明在南京北郊高空存在一定含量的气溶胶。

参 考 文 献

- [1] Liao L, Lou S J, Fu Y, *et al.* Radiative forcing of aerosols and its impact on surface air temperature on synoptic scale in eastern china[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 68-82.
廖礼, 漏嗣佳, 符瑜, 等. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 68-82.
- [2] Li J X, Yin Y, Li P R, *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.
- [3] Gao Y C, Wu J. Preliminary analysis of the effects of aerosol on slight rain reduction in eastern China[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(3): 314-321.
高艳春, 吴洞. 气溶胶影响中国东部微量降水的初步分析[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(3): 314-321.
- [4] Zhou G Q, Chen M, Peng L. Scientific monitoring of haze and its health effects[J]. Science, 2013, 65(4): 56-59.
周广强, 陈敏, 彭丽. 雾霾科学监测及其健康影响[J]. 科学, 2013, 65(4): 56-59.
- [5] Zhang X Y. Aerosol over china and their climatic 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.
- [6] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 21-27.
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 21-27.
- [7] Song X Y, Cao N W, Yang S P. Influence factors on

atmospheric aerosol optical property inversion in Nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040101.

宋秀瑜, 曹念文, 杨思鹏. 探究影响南京地区大气气溶胶光学特性反演的因素[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040101.

- [8] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652.
- [9] Su J, Liu Z Y, Wu Y H, *et al.* Retrieval of multi-wavelength aerosol lidar ratio profiles using Raman scattering and Mie backscattering signals [J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 36-40.
- [10] Shi J Z, Cao N W. Tropospheric aerosol measurements by lidar in northern suburbs of Nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100101.
施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100101.
- [11] Shen J, Cao N W. Inversion of stratospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0609002.
沈吉, 曹念文. 拉曼散射激光雷达反演平流层气溶胶消光系数廓线[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0609002.
- [12] Cao N W, Shi J Z, Zhang Y Y, *et al.* Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060101.
曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060101.
- [13] Sun H B, Cao N W. Accuracy of value k in aerosol inversion optic properties based on lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012802.
孙海波, 曹念文. 激光雷达反演气溶胶光学特性的 k 值准确度研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012802.
- [14] Cao N W, Yang S P, Xie Y H, *et al.* Aerosol profiling by Raman lidar in Nanjing, China [J]. Optics and Spectroscopy, 2015, 119(4): 700-707.
- [15] Zhou Z R, Hua D X, Yang R, *et al.* De-noising method for Mie scattering lidar echo signal based on wavelet theory[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 0701002.
周智荣, 华灯鑫, 杨蓉, 等. Mie 散射激光雷达回波信号小波去噪方法[J]. 光子学报, 2016, 45(7):

0701002.

- [16] 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.

- [17] Mickovski S B, Ennos A R. Model and whole-plant studies on the anchorage capabilities of bulbs[J]. Plant and Soil, 2003, 255(2): 641-652.