

紫外双波长激光雷达系统研制与信噪比分析

邵江锋, 华灯鑫, 汪丽*, 王东, 潘睿

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 利用 Nd:YAG 激光器产生的 10 Hz 中心波长为 355 nm 和 266 nm 的激光束作为光源, 研制了用于对流层大气气溶胶探测的紫外双波长激光雷达, 实现了气溶胶 Mie 散射信号在紫外波段的精细分离和提取。利用 266 nm 信号探测气溶胶光学特性时不受太阳背景光的影响。对双波长 Mie 散射信号日间和夜间探测信噪比的数值仿真结果和实际探测信噪比作对比分析, 得出日间探测时 355 nm 信号的信噪比较低, 夜间探测时 266 nm 信号的信噪比较低, 这与数值仿真结果一致。通过分析实际探测信噪比为 10 时的数据, 得到该系统日间探测时 266 nm 信号的探测高度可达 2 km, 夜间探测时 355 nm 信号的探测高度可达 5 km。利用该激光雷达对西安地区的晴天和雾霾天气进行初步探测, 研究分析了晴天和雾霾天气的气溶胶光学特性、臭氧浓度和消光系数。分析了臭氧浓度对反演消光系数和 Angstrom 指数的影响。结果表明, 臭氧浓度越大, 消光系数的反演误差越大。雾霾天气气溶胶的消光系数大于晴天气溶胶的消光系数。

关键词 大气光学; 激光雷达; 气溶胶; 臭氧; Angstrom 指数

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1201004

Development of Ultraviolet Dual-Wavelength Lidar and Analysis of Its Signal-to-Noise Ratio

Shao Jiangfeng, Hua Dengxin, Wang Li*, Wang Dong, Pan Rui

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Herein, an ultraviolet dual-wavelength lidar was developed for the detection of atmospheric aerosols in the troposphere. The Nd:YAG laser emitting beams of 355 and 266 nm at a frequency of 10 Hz were used as a light source by the dual-wavelength lidar. This dual-wavelength lidar achieved fine separation and extraction of the Mie scattering signal at ultraviolet wavelengths. Furthermore, it was not affected by the solar background light when 266-nm signal was used to measure the optical characteristics of the aerosol. The signal-to-noise ratios (SNRs) of the actual detection were compared with the simulation results at two wavelengths. Findings indicate that the SNR of 355-nm signal was lower during daytime detection; however, the SNR of 266-nm signal was lower during night-time detection. These results were consistent with theoretical calculations. The detection height of 266-nm signal can reach 2 km during daytime and that of 355-nm signal can reach 5 km during night-time upon analyzing the data of SNR of 10. Atmospheric observations were conducted using the proposed dual-wavelength lidar. The ozone concentration, aerosol characteristics, and extinction coefficient were studied and analyzed on hazy and sunny days. Moreover, the influence of ozone concentration on the inversion extinction coefficient and Angstrom index was analyzed. Results show that a greater ozone concentration corresponds to a larger inversion error of the extinction coefficient. The extinction coefficient of the aerosol in hazy weather was larger than that in sunny weather.

Key words atmospheric optics; lidar; aerosol; ozone; Angstrom index

OCIS codes 010.3640; 010.1110; 010.4950; 280.1100

1 引言

大气气溶胶在地球上的含量并不多,大部分在

与人类活动密切相关的对流层内,其在地球-大气辐射收支过程中扮演了重要的角色,已成为影响全球气候变化的最敏感的强迫因子^[1-3]。大气气溶胶的

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-01-19; 录用日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(41627807,61775179)

* E-mail: wlfuyun@xaut.edu.cn

光学和微物理特性在气象气候和大气环境科学等领域越来越受到人们的关注。

激光雷达作为一种主动遥感探测工具已有几十年的历史,凭借其高时空分辨率和测量精度已经广泛用于激光大气传输、全球气候预测、气溶胶辐射效应以及大气环境等领域^[4]。激光的高单色性和激光波长的可调谐能力,使激光雷达能够探测各种大气组分。特别是激光波长很短的特点,使激光束可以直接与大气中的微小粒子乃至分子相互作用,可以探测大气的各种物质成分^[5-6]。通过 Mie 散射理论计算可以得到气溶胶消光系数、后向散射系数等光学特性参数^[7-8]。因此,激光雷达成为大气遥感探测的重要工具和途径。

双波长激光雷达具有探测范围广和微粒种类多等优势,利用双波长激光雷达技术研究气溶胶的微物理和光学特性,可以获得气溶胶的许多微物理特性参数,如气溶胶 Angstrom 指数等。双波长激光雷达已经日趋成为当前大气遥感探测的热点和前沿,国内外在这一方面的工作已有很多^[9-12]。2005年,王向川等^[13]研制了一台双波长 Mie 散射激光雷达,用于 532 nm 和 1064 nm 两个波长信号对气溶胶的探测,得到两个波长上的激光雷达比。2008年,迟如利等^[14]研制了用于白天观测的双波长 Mie 散射激光雷达,用于 532 nm 和 1064 nm 两个波长信号对对流层气溶胶的探测,并且采用窄带滤光片,借助小孔光栅,有效压制背景光。2009年,迟如利等^[15]研制了基于 532 nm 和 1064 nm 的双波长 Mie

散射激光雷达,采用 4 通道接收回波信号,缩短了获取大气信息的时间,提高了系统的白天探测能力。2012年,伯广宇等^[16]研制了机载双波长偏振激光雷达,实现了大空间尺度上探测气溶胶的时空分布。

以往的双波长激光雷达主要以可见光、近红外光为主,关于紫外和日盲波段的报道较少。本文研发了一台紫外双波长的后向散射式激光雷达,建立了一种能够同步准确观测对流层内大气气溶胶光学特性、微物理特性等参数的测量方法和技术手段,并实现了晴天和雾霾天气的探测。探测结果的分析结果可以为西安地区气溶胶变化趋势以及大气环境监测提供有效的数据。

2 系统组成及工作原理

给出了紫外双波长激光雷达系统的组成原理,如图 1 所示。选用 Nd:YAG 脉冲激光器,发射三倍频波长 355 nm 和四倍频波长 266 nm 脉冲激光,经全反镜 M1 以非同轴方式发射到大气中。发射到大气中的激光束与大气气溶胶粒子相互作用产生 Mie 散射后向散射信号,经卡塞格林望远镜接收后,经透镜准直,由全反镜 M2 反射到分色片 BS1,由分色片分出 266 nm 波长和 355 nm 波长的信号,经聚焦透镜 lens 1 和 lens 2 聚焦后,266 nm 波长和 355 nm 波长的信号分别由光电倍增管(PMT1 和 PMT2)接收。通过两个数据采集卡分别采集两个波长的后向散射信号,最后由计算机进行处理和显示。紫外双波长激光雷达系统参数如表 1 所示。

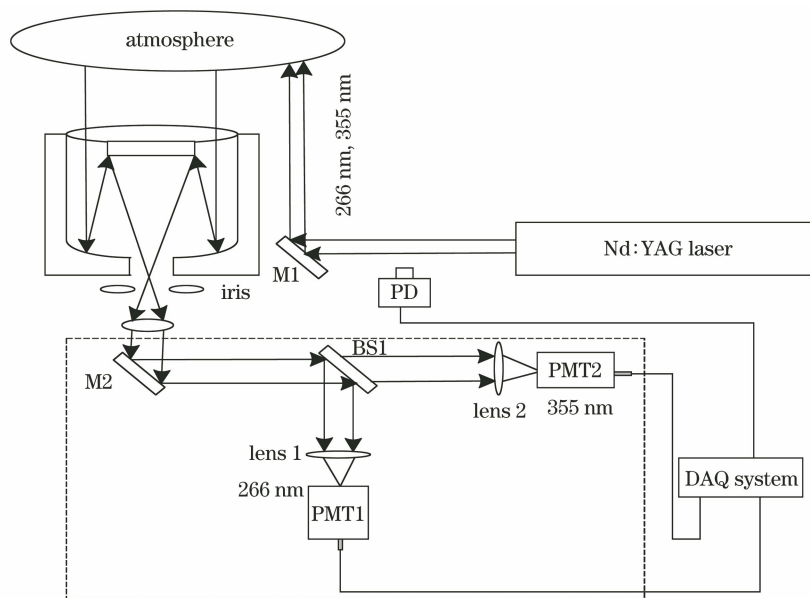


图 1 双波长激光雷达组成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the dual-wavelength lidar

表 1 双波长激光雷达系统配置

Table 1 Configuration of the dual-wavelength lidar system

| Device | Parameter | Value |
|---------------|-------------------------|---------|
| | Type | Nd:YAG |
| | Wavelength /nm | 266/355 |
| Laser | Energy at 266 nm/mJ | 60 |
| | Energy at 355 nm/mJ | 120 |
| | Divergence angle /mrad | 0.5 |
| Beam splitter | Reflectivity at 266 nm | 0.5 |
| | Transmittance at 355 nm | 0.5 |
| Telescope | Diameter /mm | 400 |
| | Field of view /mrad | 1 |
| Detector | PMT; Hamamatsu R7056 | |

3 激光雷达数据反演

3.1 信噪比反演

紫外双波长激光雷达在用于大气遥感探测时,因要受到各种各样噪声的影响,双波长激光雷达系统的探测性能会受到一定的影响,所以信噪比是双波长激光雷达系统性能的重要参数之一,信噪比即大气气溶胶的 Mie 散射信号与激光雷达系统接收的所有信号的比值。激光雷达的系统信噪比(SNR, R_{SN})表达式为

$$R_{SN} = \frac{N_s \cdot \sqrt{m_0}}{[N_s + 2(N_B + N_D)]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中: N_s 为探测器接收的光子数; m_0 为采样的平均脉冲数; N_B 为背景噪声光子数; N_D 为暗电流光子数。266 nm 波长的太阳背景噪声光子数为零,只需考虑 266 nm 波段臭氧吸收的影响。

3.2 气溶胶消光系数反演

激光雷达接收到的高度为 R 处的大气后向散射回波信号的能量 $P(R)$ 由激光雷达方程决定,即^[17]

$$P(R) = P_0 CY(R)R^{-2}(\beta_m + \beta_a) \times \exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha(R') + \delta] dR'\right\}, \quad (2)$$

式中: P_0 是激光的发射功率; C 是系统常数; $Y(R)$ 为几何重叠因子; δ 为臭氧吸收系数; R 为探测距离; β_a 和 β_m 为距离 R 处大气气溶胶散射系数和分子散射系数; $\alpha(R)$ 为发射距离到 R 处的消光系数。随着激光雷达测量技术的进步,多种反演气溶胶消光系数的算法应运而生。目前常用的方法有 Collis 的斜率法、Klett 的分析反演算法和 Fernald 方法^[17-20]。本文采用 Fernald 方法对消光系数进行反演,令 $\eta = \frac{W_M}{W_r} a_r(R_L)$, $\xi = \frac{R^2 P(R)}{Y(R)}$, $\zeta =$

$\exp\left[2\left(\frac{W_M}{W_r} - 1\right) \int_R^{R_L} a_r(R') dR'\right]$, 则大气气溶胶的消光系数可表示为

$$a_M(R) = -\eta + \frac{\xi \zeta}{\xi / a_M(R_L) + \eta + 2 \int_R^{R_L} R'^2 P(R') \zeta dR'}, \quad (3)$$

其中: $\alpha_r(R)$ 为大气分子的消光系数,由大气标准模型确定; $\alpha_M(R_L)$ 为参考高度 R_L 处大气气溶胶的消光系数; W_r 为大气分子的雷达比; W_m 为激光雷达比。根据参考资料^[18],进行几何重叠因子的校正,中国大气气溶胶雷达比在 40~55 之间变化,当激光波长很接近时,可认为雷达比相等,故本研究中雷达比直接选用经验值 50^[20],大气分子的雷达比为 $8\pi/3$ 。基于 266 nm 波长激光束反演的消光系数包含了臭氧的吸收系数,实际的消光系数需剔除臭氧的吸收系数。

3.3 臭氧浓度

臭氧浓度的垂直分布可以由激光雷达接收的大气分子和气溶胶后向散射信号反演求得,在 ΔR 内的臭氧浓度为^[21]

$$C(R) = \frac{1}{2\epsilon \cdot \Delta R} \left\{ \ln \left[\frac{P(R)}{P(R + \Delta R)} \right] \cdot \ln \frac{\beta(R)/R^2}{\beta(R + \Delta R)/(R + \Delta R)^2} - 2[\varphi_M(R, \Delta R) + \varphi_r(R, \Delta R)] \right\}, \quad (4)$$

式中: ϵ 为臭氧对激光波长的吸收截面; $\beta(R)$ 为总的后向散射系数; $\varphi_M(R, \Delta R)$ 和 $\varphi_r(R, \Delta R)$ 为大气气溶胶的光学厚度和大气分子的光学厚度。大气分子的后向散射系数由大气标准模型确定,气溶胶的消光系数、后向散射系数由 355 nm 波长信号的探测结果加以修正。 $P(R)$ 为激光雷达 266 nm 回波信号的距离平方校正信号,由此可以获得臭氧浓度的垂直分布。

3.4 Angstrom 指数

Angstrom 指数与气溶胶粒子粒径大小有关,因此可以利用双波长激光雷达的二个通道,得到 Angstrom 指数随高度的变化曲线。粗粒子越多,Angstrom 指数越小,故可用 Angstrom 指数反映大气中粗细粒子数目的占比^[22-24]。Angstrom 可以采用不同波长的消光系数表示,即

$$A(R) = \frac{\ln[\alpha(\lambda_1)/\alpha(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}. \quad (5)$$

Angstrom 指数与气溶胶粒子大小呈比例关系,当光散射受到粗粒子和细粒子共同作用时,使用两个波段的 Angstrom 指数来分析气溶胶微物理特性,可以对粒子粒径的大小进行更深入的研究。Angstrom 波长指数与大气气溶胶粒子的平均半径有很好的相关性:如果 Angstrom 波长指数远小于 1,那么粒径大于入射波长的粒子很多;如果 Angstrom 波长指数大于 2,那么粒径小于入射波长粒子的粒子数目所占的比重较大^[21]。

4 双波长激光雷达系统信噪比分析

根据美国标准大气模型^[16]和系统参数,可得两个波长激光雷达回波信号随高度变化的仿真曲线,如图 2 所示。

从图 2 可见,在 5 km 以下,266 nm 和 355 nm 信号日间的探测距离分别为 3.1 km 和 1.2 km ($R_{SN} = 10$),夜间的探测距离分别为 4.2 km 和 6.4 km

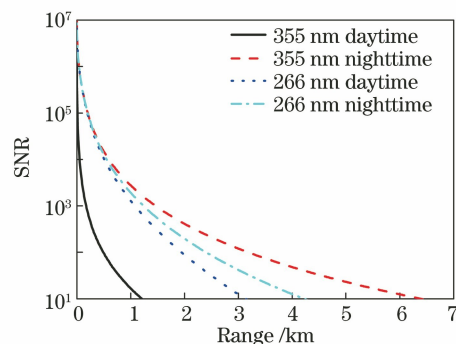


图 2 信噪比的仿真模拟

Fig. 2 Simulation of signal-to-noise ratio

($R_{SN} = 10$)。日间 355 nm 信号的探测距离比 266 nm 信号的探测距离小 1.9 km,夜间 355 nm 信号的探测距离比 266 nm 信号的探测距离大 2.2 km。日间天空背景光影响 355 nm 信号的有效探测距离,臭氧浓度影响 266 nm 信号的有效探测距离。

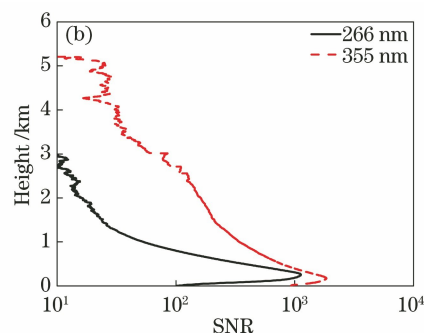
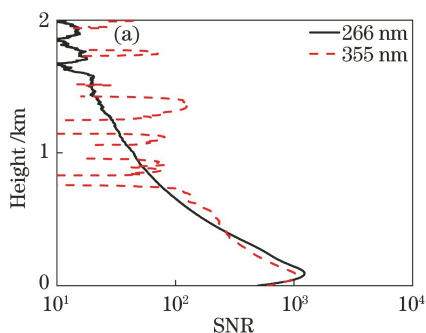


图 3 实际探测信噪比。(a)日间探测;(b)夜间探测

Fig. 3 SNR of the actual detection. (a) During daytime detection; (b) during nighttime detection

紫外双波长激光雷达实际探测信噪比如图 3 所示。图 3(a)的探测时间为 2018 年 1 月 31 日 12:36,由图可知,266 nm 日盲信号的信噪比较高,有效探测距离可以达到 1.66 km。这是由于日间太阳背景光噪声对 355 nm 信号的影响较大,有效探测距离为 0.75 km。图 3(b)的探测时间为 2018 年 1 月 31 日 17:25,由图可知,355 nm 信号的信噪比较高,有效探测距离可以达到 5.2 km。这是由于夜间太阳背景光噪声为零,对 355 nm 信号无影响,激光能量较大。日间 266 nm 信号的有效探测距离小于夜间信号的有效探测距离,说明日间臭氧浓度高于夜间。

5 双波长激光雷达初步实验结果与分析

用该双波长激光雷达对西安地区晴天、雾霾天的大气气溶胶进行了初步探测。图 4 所示为利用该激光

雷达晴天白天探测得到的西安城区气溶胶总的消光系数廓线。高度 1 km 以下 266 nm 波长信号的消光系数大于 355 nm 信号的消光系数。高度 2 km 以下 266 nm 信号的消光系数为 $0.04 \sim 1.10 \text{ km}^{-1}$,高度 1 km 以下 355 nm 信号的消光系数为 $0.04 \sim 0.21 \text{ km}^{-1}$ 。

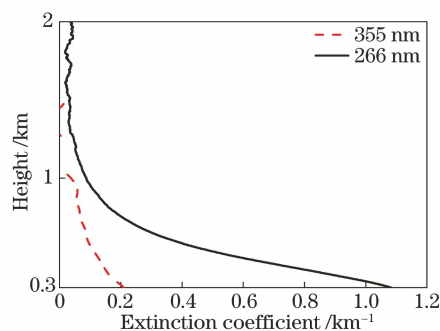


图 4 晴天探测气溶胶消光系数廓线

Fig. 4 Detection extinction coefficient profile of aerosol on a fine day

利用该激光雷达晴天白天探测得到的西安城区臭氧浓度廓线如图 5 所示。高度 1 km 以下 266 nm 波长气溶胶的后向散射系数由 355 nm 波长信号修正, 266 nm 波长大气分子的后向散射系数由大气标准模型确定。从图 5 可以看出, 随着探测高度的增加, 臭氧浓度逐渐减小。高度 0.3 km 时臭氧浓度最大为 $23.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与气象局在西安理工大学附近观测点测得的地面臭氧浓度 $25.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 相比, 相对误差为 8.4%, 这是因为人类生产生活活动导致的臭氧在边界层内聚集。

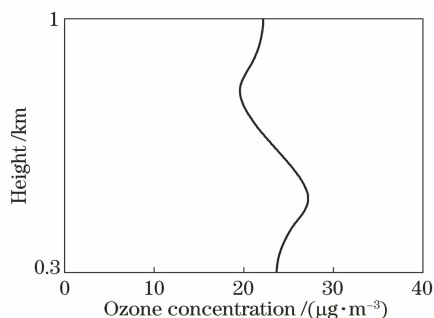


图 5 晴天探测臭氧浓度廓线

Fig. 5 Detection ozone concentration profile on a fine day

剔除臭氧吸收系数的 266 nm 波长气溶胶消光系数廓线如图 6(a) 所示。剔除臭氧吸收系数的 266 nm 波长气溶胶消光系数明显减小, 尤其是高度为 1 km 时, 消光系数为 0.06 km^{-1} , 这说明在这个高度气溶胶颗粒物较少, 空气较为纯净。因为晴天时大气边界层高度一般在 0.5 km 左右, 大气气溶胶一般聚集于此。而在高度为 0.3 km 时, 消光系数为 1.05 km^{-1} , 这是因为底层大气气溶胶较多, 受人类生产生活的影响较大。图 6(b) 为反演获得的 Angstrom 指数廓线。 $A_{355/266}$ 指数的变换趋势在剔除臭氧的影响前后相似, 都是先增大再减小。剔除臭氧的影响后, 在高度为 1 km 时, $A_{355/266}$ 指数比较接近于 1。图 6(c) 和 (d) 分别为 266 nm 消光系数的绝对误差和 Angstrom 指数的绝对误差。从图中可以看出, 266 nm 消光系数的绝对误差廓线的变化趋势基本与臭氧浓度廓线变化趋势一致。而 Angstrom 指数的绝对误差随着距离的增加而增大, 与臭氧浓度和消光系数变化趋势不一致, 这是因为由(5)式可知, Angstrom 指数与 266 nm/355 nm 两个波长的消光系数密切相关, 均受到两个波长消光系数的影响。

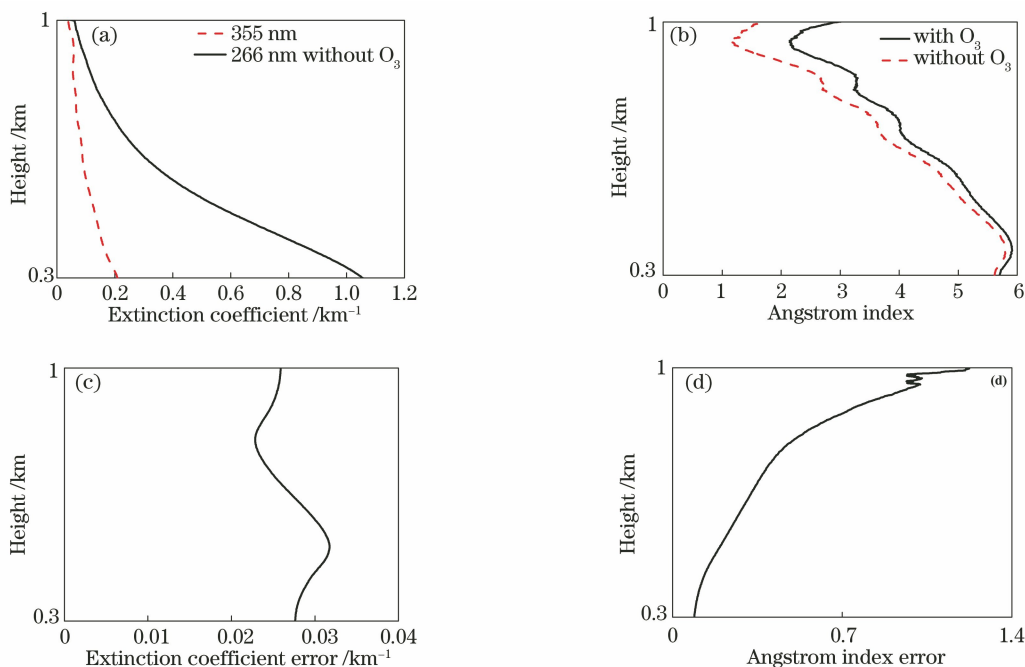


图 6 晴天探测结果。(a)剔除臭氧影响后气溶胶消光系数廓线;(b) Angstrom 指数;
(c) 266 nm 消光系数的绝对误差;(d) Angstrom 指数的绝对误差

Fig. 6 Detection results on a fine day. (a) Extinction profiles of aerosols without ozone; (b) Angstrom index;
(c) absolute error of extinction coefficient at 266 nm; (d) absolute error of Angstrom index

利用该激光雷达雾霾天气探测得到的西安城区气溶胶总的消光系数廓线如图 7 所示。高度 3 km 以下 266 nm 总消光系数大于 355 nm 消光系数。

高度 2 km 以下 266 nm 消光系数为 $0.39 \sim 2.10 \text{ km}^{-1}$, 高度 3 km 以下 355 nm 消光系数为 $0.24 \sim 1.20 \text{ km}^{-1}$ 。与晴天相比, 雾霾天气 266 nm

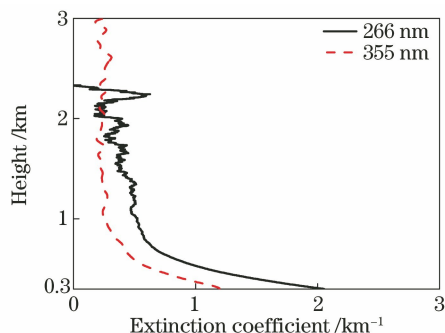


图 7 雾霾天探测气溶胶消光系数廓线

Fig. 7 Detection extinction profiles of aerosols on a haze day with 355 nm 波长的消光系数较大。

利用该激光雷达雾霾天探测得到的西安城区臭氧浓度廓线如图 8 所示。高度 2 km 以下 266 nm 波长气溶胶的后向散射系数由 355 nm 波长信号修正, 266 nm 波长大气分子的后向散射系数由大气标准模型确定。从图 8 可以看出, 随着探测高度的增加, 臭氧浓度先逐渐减小再增大。高度 0.3 km 时臭氧浓度最大为 $49.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 与气象局在西安理工大学附近观测点测得的地面臭氧浓度 $54.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 相比, 相对误差为 9.4%。这是因为雾霾天气不利于臭氧的扩散, 随着雾霾颗粒聚集在底层。

剔除臭氧吸收系数的 266 nm 波长气溶胶消光

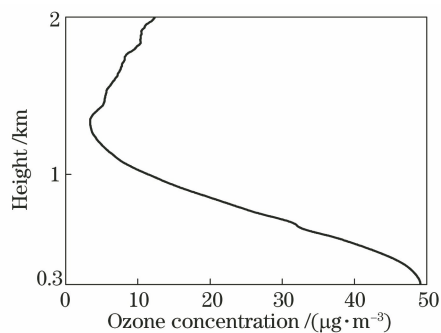


图 8 雾霾天探测臭氧浓度廓线

Fig. 8 Detection ozone concentration profile on a haze day

系数廓线如图 9(a) 所示。剔除臭氧吸收系数的 266 nm 波长气溶胶消光系数明显减小, 尤其是高度为 0.45~0.80 km 时, 消光系数已经小于 355 nm 波长的消光系数。图 9(b) 为反演获得的 Angstrom 指数廓线。 $A_{355/266}$ 指数的变换趋势在剔除臭氧的影响前后已经不同。剔除臭氧前, $A_{355/266}$ 指数在 2 附近震荡, 变化不大, 故无法精准地反映大气的状态。而剔除臭氧后, $A_{355/266}$ 指数变化较大。在 0.30~0.74 km 之间, $A_{355/266}$ 随着距离的增加而减小, 在 -0.92~0.78 之间变化。在这个高度存在雾霾层, 气溶胶中大颗粒物占比较多。在 0.74~1.40 km 之间, $A_{355/266}$ 随着距离的增加而增加, 在 -0.92~2.40

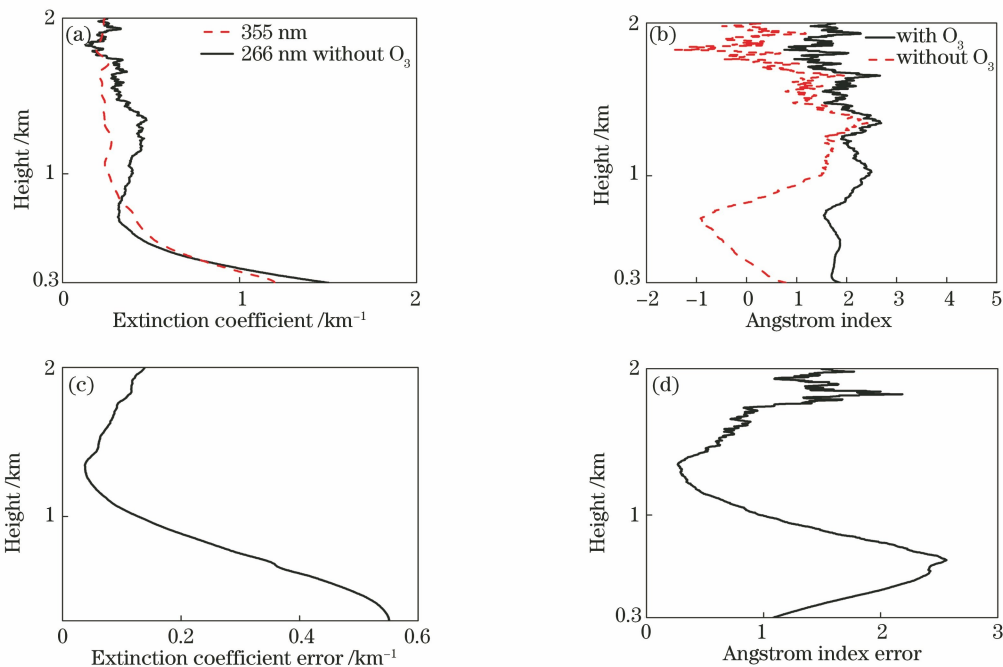


图 9 雾霾天探测结果。(a) 剔除臭氧影响后气溶胶消光系数廓线; (b) Angstrom 指数; (c) 266 nm 消光系数的绝对误差; (d) Angstrom 指数的绝对误差

Fig. 9 Detection results on a haze day. (a) Extinction profiles of aerosols without ozone; (b) Angstrom index; (c) absolute error of extinction coefficient at 266 nm; (d) absolute error of Angstrom index

之间变化。在 0.74~0.83 km 之间, $A_{355/266}$ 指数在 -0.92~0 之间变化, 远小于 1, 粒径大于入射波长的粒子很多。在 1.28~1.40 km 之间, $A_{355/266}$ 指数大于 2, 那么粒径小于入射波长粒子的粒子数目所占的比重较大。图 9(c) 和 (d) 分别为雾霾天 266 nm 消光系数的绝对误差和 Angstrom 指数的绝对误差。从图中可以看出与晴天一样, 266 nm 消光系数的绝对误差廓线的变化趋势基本与臭氧浓度廓线变化趋势一致。在高度为 0.30~0.70 km 之间, Angstrom 指数的绝对误差随着距离的增加而增大; 高度为 0.70~1.40 km 之间, Angstrom 指数的绝对误差随着距离的增加而减小; 高度为 1.40~2.00 km 之间, Angstrom 指数的绝对误差随着距离的增加而增

加。在高度为 0.3~0.7 km 之间, Angstrom 指数绝对误差的变化趋势与臭氧浓度和消光系数的变化趋势不一致。

利用激光雷达系统探测的近地面臭氧浓度和气象站观测的臭氧浓度如图 10 所示。通过连续 8 h 的观测, 可以看出激光雷达系统探测的近地面臭氧浓度和气象站观测的臭氧浓度的变化趋势一致, 相对误差均在 10% 以内。臭氧浓度最大值出现在 20:00, 最小值出现在凌晨 3 点。这是因为随着夜间人类生产生活活动的减少, 近地面臭氧浓度也逐渐降低。利用激光雷达系统探测的气溶胶消光系数 THI(Time-height-index) 如图 11 所示, 图 11(a) 为同一时刻剔除臭氧吸收系数的 266 nm 波长气溶胶

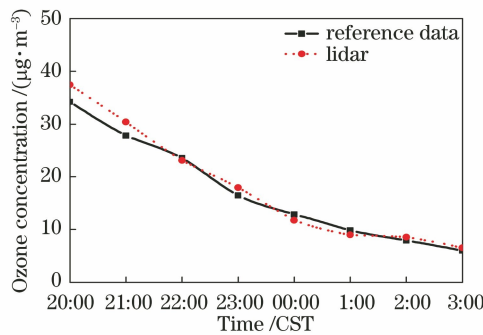


图 10 激光雷达测量臭氧浓度数据与气象站监测臭氧数据对照

Fig. 10 Concentrations of ozone obtained by the Mie lidar compared with weather station

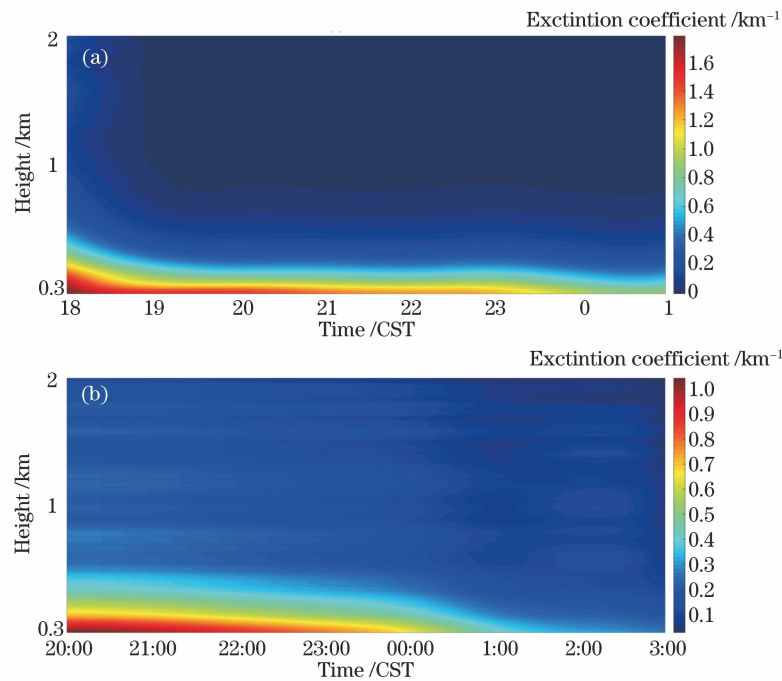


图 11 夜晚 20:00 至凌晨 03:00 CST 连续探测气溶胶消光系数 THI 图。(a) 剔除臭氧吸收系数的 266 nm 波长消光系数; (b) 剔除臭氧吸收系数的 355 nm 波长消光系数

Fig. 11 THI of aerosol extinction coefficient from 20:00 CST to 03:00 CST. (a) Aerosol extinction coefficient at 266 nm without ozone absorption coefficient; (b) aerosol extinction coefficient at 355 nm without ozone absorption coefficient

消光系数,图 11(b)为355 nm波长的消光系数。由图 11 中可以清楚地看出8 h内266 nm与355 nm信号探测到的大气边界层高度的变化趋势基本一致,夜晚 20:00 CST(China Standard Time)近地面高度气溶胶浓度较高,大气边界层高度较高。从夜晚 20:00 CST 至凌晨 3 点,大气气溶胶浓度和大气边界层高度都逐渐降低,这是因为夜晚中,太阳辐射为 0,地表的温度降低,随着人类生产生活活动的减少,气溶胶浓度和边界层高度逐渐降低。

6 结 论

设计和构建了探测对流层内大气气溶胶的紫外双波长激光雷达,通过分析日间和夜间实际探测信噪比,以及晴天和雾霾天气情况下实际探测消光系数、臭氧浓度和 Angstrom 指数,验证了紫外双波长激光雷达系统设计的性能,表明了该紫外双波长激光雷达具有较高的实用性。描述了双波长激光雷达信号数据处理和反演算法。利用该双波长激光雷达系统对西安市上空大气进行了探测。研究了雾霾天和晴天条件下,西安上空气溶胶消光特性、臭氧浓度和 Angstrom 指数的变化。分析了臭氧浓度对气溶胶消光特性 Angstrom 指数反演的影响。研究表明:雾霾天气下的消光系数明显高于晴天;雾霾天气下的 Angstrom 指数小于晴天。这说明在雾霾天气中,大气中有较多的粗粒子存在,而晴天时细粒子占主要地位。利用激光雷达系统连续观测的近地面臭氧浓度变化趋势与气象站观测资料一致,相对误差小于 10%。剔除臭氧吸收系数的 266 nm 消光系数变化趋势与 355 nm 消光系数变化趋势一致。运用双波长激光雷达信号可以研究对流层内气溶胶粒子的光学特性的时空变化规律,为西安地区气溶胶观测和研究提供技术手段和基础硬件。

参 考 文 献

- [1] Zhao H, Hua D X, Di H G, et al. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0113001.
赵虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0113001.
- [2] Dai Y J. Laser and infrared sounds principle [M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 2012: 271-272.
戴永江. 激光与红外探测原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 271-272.
- [3] Althausen D, Müller D, Ansmann A, et al. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(11): 1469-1482.
- [4] Wang Y F, Hua D X, Wang H W, et al. Analysis of all-fiber Raman lidar system for water vapor by fiber Fabry-Perot filters [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 103-109.
王玉峰, 华灯鑫, 王红伟, 等. 基于光纤 F-P 滤波器全光纤水汽拉曼激光雷达系统的设计与分析[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 103-109.
- [5] Xu L M. Development of a compact Mie lidar system for atmospheric aerosol detection [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 1-5.
徐黎明. 大气气溶胶探测小型 Mie 散射激光雷达系统的设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 1-5.
- [6] Mao J T, Zhang J H, Wang M H. 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.
- [7] Qiu J H, Chen H B. Atmospheric physics and atmospheric sounding [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 11-12.
邱金桓, 陈洪滨. 大气物理与大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 11-12.
- [8] Luo H H, Chen Z Y, Zhang T S, et al. Comparison of aerosol vertical distribution based on CALIPSO satellite and ground observation data [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1201003.
罗卉卉, 陈臻懿, 张天舒, 等. 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1201003.
- [9] Qiu J H, Lü D R, Chen H B, et al. Modern research progresses in atmospheric physics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 628-652.
邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 628-652.
- [10] Müller D, Wandinger U, Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2346-2357.
- [11] Müller D, Wandinger U, Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: simulation [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2358-2368.
- [12] Müller D, Wagner F, Wandinger U, et al. Microphysical particle parameters from extinction and

- backscatter lidar data by inversion with regularization: experiment [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(12): 1879-1892.
- [13] Wang X C, Rao R Z. Lidarratios for atmospheric aerosol and cloud particles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1321-1324.
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): 1321-1324.
- [14] Chi R L, Wu D C, Liu B, et al. Dual-wavelength Mie lidar for measuring the whole tropospheric aerosols [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(3): 179-186.
迟如利, 吴德成, 刘博, 等. 探测气溶胶消光特性的双波长米散射激光雷达[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(3): 179-186.
- [15] 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] Bo G Y, Liu D, Wang B X, et al. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 1014002.
伯广宇, 刘东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1014002.
- [17] Zhou J, Yue G M, Jin C J, et al. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1412-1417.
周军, 岳古明, 金传佳, 等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2000, 20(10): 1412-1417.
- [18] Di H G, Hua D X, Wang Y F, et al. Investigation on the correction of the Mie scattering lidar's overlapping factor and echo signals over the total detection range? [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 242-248.
狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 米散射激光雷达重叠因子及全程回波信号标定技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 242-248.
- [19] Cheng X W, Song J, Li F Q, et al. Dual-wavelength high altitude detecting lidar technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5): 601-606.
程学武, 宋娟, 李发泉, 等. 双波长高空探测激光雷达技术[J]. *中国激光*, 2006, 33(5): 601-606.
- [20] Zhong Z Q, Liu B, Fan A Y, et al. Two-wavelength Mie lidar with two receivers [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(3): 173-178.
钟志庆, 刘博, 范媛媛, 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.
- [21] Di H G, Hou X L, Zhao H, et al. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 244206.
狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析? [J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 244206.
- [22] Schotland R M. Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1974, 13(1): 71-77.
- [23] Liu D, Wang Y J, Tao Z M, et al. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001.
刘东, 王英俭, 陶宗明, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228001.
- [24] Bo G Y, Liu D, Wu D C, et al. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days [J]. *Chinese Journal of 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.