



探测气溶胶-水汽的拉曼-米散射激光雷达系统

李路 邢昆明 赵明 邓迁 王邦新 庄鹏 施云

Raman-Mie scattering lidar system for detection of aerosol and water vapor in the atmosphere

Li Lu, Xing Kunming, Zhao Ming, Deng Qian, Wang Bangxin, Zhuang Peng, Shi Yun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220484>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气气溶胶污染监测中应用的新型全天时户外型拉曼-米散射激光雷达系统

New all-weather outdoor Raman-Mie scattering lidar system used in atmospheric aerosol pollution monitoring

红外与激光工程. 2019, 48(7): 706001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0706001>

利用CCD和后向散射激光雷达精确探测近地面气溶胶消光系数廓线

Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar

红外与激光工程. 2019, 48(S1): 43 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S106007>

基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法研究

Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar

红外与激光工程. 2017, 46(4): 411001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0411001>

用于水汽混合比自标定的532 nm/660 nm双波长激光雷达

532 nm/660 nm dual wavelength lidar for self-calibration of water vapor mixing ratio

红外与激光工程. 2018, 47(12): 1230004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1230004>

单波长发射五通道接收激光雷达系统研制

Development of lidar system based on one wavelength emission and five channel receivers

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1030002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201765.1030002>

户外型探测臭氧和气溶胶激光雷达系统研制

Outdoor lidar system for measurement of ozone and aerosol profiles

红外与激光工程. 2019, 48(7): 706008 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0706008>

探测气溶胶-水汽的拉曼-米散射激光雷达系统

李 路^{1,2}, 邢昆明^{2*}, 赵 明², 邓 迁², 王邦新^{2,3}, 庄 鹏², 施 云¹

- (1. 皖西学院 机械与车辆工程学院, 安徽 六安 237012;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 设计和构建了发射波长为 355 nm 和 532 nm 的户外型全天时激光雷达系统, 用于探测大气气溶胶和水汽。运用 355 nm 和 532 nm 的米散射、532 nm 的偏振、氮气和水汽分子的拉曼激光雷达技术, 用于对边界层结构、对流层气溶胶和云光学特性及其形态、水汽混合比进行连续探测研究。该系统结构紧凑, 运输方便, 具备远程操作、数据传输、一键式启动等功能。利用该系统对大气气溶胶和水汽进行探测, 探测结果表明: 在大气气溶胶的探测过程中, 在重污染条件下混合层高度较干净天低, 在 0.5 km 以下, 而干净天在 1 km 左右; 通过对消光系数、Angstrom 指数和退偏振比分析可知, 重污染条件下, 底层大气气溶胶以球形粗粒子污染物为主, 干净天底层大气气溶胶以球形细粒子污染物为主; 在云层中, Angstrom 指数明显减小, 且出现负值, 说明云粒子半径较大。在水汽探测过程中, 采用自标定方法获得系统的标定常数为 121, 与已标定的激光雷达系统对比, 误差在 ± 0.3 g/kg 以内; 连续探测结果表明可对夜晚 5 km 及白天混合层以内进行探测。该系统满足产品化的需求, 可广泛运用于大气环境的监测领域中。

关键词: 激光雷达; 气溶胶; 水汽混合比; 消光系数; Angstrom 指数; 退偏振比

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220484

0 引 言

随着社会经济的不断发展, 环境问题日益严重, 获得大气参数(如气溶胶、水汽、温度等)越来越受到环保和气象部门的重视。开展大气气溶胶和水汽的连续探测研究, 可以提高天气预报的准确性, 对研究大气污染气溶胶特性及扩散机理、云的形成、降雨等具有重要的科学意义。激光雷达作为一种主动遥感探测工具, 具备传统大气探测方法无法比拟的时空分辨率及连续性, 在大气参数测量中发挥着重要作用^[1-4]。

2004 年, 谢晨波等^[5]研制的国内首台车载式大气探测激光雷达系统, 用于探测大气气溶胶和水汽, 出射波长为 355 nm(300 mJ) 和 532 nm(150 mJ)。2010 年, 吕炜煜等^[6]研制的车载激光雷达系统, 用于探测对流层

气溶胶和水汽, 出射波长为 355 nm(400 mJ) 和 1064 nm(400 mJ)。2014 年, 谭敏等^[7-8]研制的温度、水汽和气溶胶拉曼激光雷达, 用于探测大气温度、水汽和气溶胶, 出射波长分别为 355 nm(500 mJ)、532 nm(200 mJ) 和 1064 nm(300 mJ)。通过对以上激光雷达系统的分析可知, 利用出射波长 355 nm 的氮气拉曼散射回波信号和水汽拉曼散射回波信号探测水汽混合比, 能量在 300 mJ 以上; 355、532、1064 nm 的米散射用于探测大气气溶胶, 能量在 150 mJ 以上。这种采用大能量的出射波长, 可以有效提高白天的信噪比, 实现水汽的白天探测, 但所设计的激光雷达系统具有成本高、尺寸大、结构复杂等缺点, 很难实现其市场化。

随着激光雷达技术的不断成熟, 激光雷达向着小型化、产品化及简单化方向发展, 为了满足国家环保

收稿日期: 2022-07-11; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2021 A0945); 皖西学院高层次人才项目(WGKQ2022013, WGKQ2022015); 中国科学院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(KP-2019-05); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA17040524); 2019 年安徽省科技重大专项(201903c08020013)

作者简介: 李路, 男, 讲师, 博士, 主要从事大气激光雷达技术方面的研究。

通讯作者: 邢昆明, 男, 工程师, 硕士, 主要从事大气激光雷达光机结构优化设计方面的研究。

部门及时了解大气参数的测量要求,中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室研制了一套户外型全天时大气气溶胶-水汽激光雷达产品,用于气溶胶及水汽的长期探测。

1 探测原理

大气气溶胶-水汽激光雷达中三波长米散射激光雷达方程为:

$$[P(r, \lambda) - P_{bg'}(r, \lambda)]r^2 = C[\beta_a(r, \lambda) + \beta_m(r, \lambda)] \cdot \exp\left\{-2\int_0^r [\alpha_a(r', \lambda) + \alpha_m(r', \lambda)]dr'\right\} \quad (1)$$

式中: $P(r, \lambda)$ 为雷达接收的高度为 r 处的后向散射回波功率, km; $P_{bg'}(r, \lambda)$ 为雷达接收的背景信号; λ 为激光波长, nm; C 为激光雷达系统的常数; $\beta_m(r, \lambda)$ 和 $\alpha_m(r, \lambda)$ 分别为空气分子的后向散射系数和消光系数,由大气模式计算获得; $\beta_a(r, \lambda)$ 和 $\alpha_a(r, \lambda)$ 分别为大气气溶胶的后

向散射系数, $\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 和消光系数, km^{-1} 。

反演大气气溶胶消光系数采用 Fernald 方法,该方法在反演过程中需要假设激光雷达比 S_a (气溶胶消光后向散射比),受到气溶胶特性和波长的影响。文中假定激光雷达比 S_a 为常数,取 532 nm 和 355 nm 的 S_a 为 50 sr。空气分子激光雷达比 S_m (空气分子消光后向散射比)由大气模式获得,为 $8\pi/3 \text{sr}^{9-11}$ 。

在利用 Fernald 方法反演的过程中,需要选取不含气溶胶粒子的洁净大气的高度作为标定高度 r_c ,取 $\beta_a(r_c)/\beta_m(r_c)$ 为 0.01。但激光雷达在实际探测过程中,由于受到污染或在有云的天气下,实际探测距离达不到干净的大气高度,这样选取的边界值会严重影响反演精度,特别对两波长的反演信号后续分析产生影响,边界高度的边界值的选择非常重要。根据文献 [12],文中采用公式 (2) 作为 Fernald 方法反演边界值的判据,减小反演误差,利用迭代法可以找出准确的边界值。

$$\frac{\left| \frac{[P(r_c) - P_{bg'}(r)]}{\alpha_a(r_c) + \alpha_m(r_c)} r_c^2 \left\{ 2\tau[\alpha_a(r_c) + \alpha_m(r_c)] + \frac{\{2\tau[\alpha_a(r_c) + \alpha_m(r_c)]\}^2}{2!} \right\} - 2\int_{r_0}^{r_c} [P(r) - P_{bg'}(r)]r^2 dr \right|}{2\int_{r_0}^{r_c} [P(r) - P_{bg'}(r)]r^2 dr} \leq 5\% \quad (2)$$

其中,

$$\tau(r_c, \lambda) = \int_{r_0}^{r_c} [\alpha_a(r', \lambda) + \alpha_m(r', \lambda)]dr' \quad (3)$$

式中: r_c 为边界点的高度; r_0 为激光雷达的回波信号全接收的最低高度。

混合层高度是指大气气溶胶浓度梯度变化最大的高度,记为 h_{GM} ,其表达式为:

$$h_{GM} = \min \frac{d[P(r)r^2]}{dr} \quad (4)$$

Angstrom 指数 A 是度量气溶胶粒子尺度的一个重要参数,其表达式为:

$$A_{\lambda_1/\lambda_2} = -\frac{\ln(\beta_{a,\lambda_1}(r)/\beta_{a,\lambda_2}(r))}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (5)$$

当细粒子模态 (50~500 nm) 和粗粒子模态 (大于 500 nm) 共同影响光散射时,利用两个波长指数可以更深入地研究气溶胶粒子的半径 [10]。文中研制的雷

达系统有 355 nm 和 532 nm 两种波长,利用 $A_{532/355}$ 分析不同天气下的气溶胶粒子特性。

偏振激光雷达的偏振特性可用于研究气溶胶粒子的形态特征,是探测冰晶云和沙尘气溶胶等非球形粒子的最有效的方法,文中系统设计的波长 532 nm 的退偏振比可以表示为:

$$\delta(r, \lambda) = k(\lambda) \frac{P_{rs}(r)}{P_{rp}(r)} \quad (6)$$

式中: $P_{rs}(r)$ 和 $P_{rp}(r)$ 分别为雷达接收的回波功率的平行分量和垂直分量; $k(\lambda) = k_p(\lambda)/k_v(\lambda)$,为两通道的增益比,即标定因子,可通过实验获得。

水汽拉曼激光雷达探测的水汽混合比 (g/kg) 可表达为:

$$w(r) = C_{wv} \frac{T(\lambda_{R,N}, r_0, r)P_{R,WV}(r, \lambda_{R,WV})}{T(\lambda_{R,WV}, r_0, r)P_{R,N}(r, \lambda_{R,WV})} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T(\lambda_{R,N}, r_0, r) = \exp\left\{-\int_{r_0}^r [\alpha_m(r', \lambda_{R,N}) + \alpha_a(r', \lambda_{R,N})]dr'\right\} \\ T(\lambda_{R,WV}, r_0, r) = \exp\left\{-\int_{r_0}^r [\alpha_m(r', \lambda_{R,WV}) + \alpha_a(r', \lambda_{R,WV})]dr'\right\} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\lambda_{R,N}$ 和 $\lambda_{R,WV}$ 分别为 N_2 分子和 H_2O 分子的拉曼波长； $P_{R,WV}(r, \lambda_{R,WV})$ 和 $P_{R,N}(r, \lambda_{R,N})$ 分别为高度为 r 处的 H_2O 分子和 N_2 分子的拉曼回波信号； $T(\lambda_{R,N}, r_0, r)/T(\lambda_{R,WV}, r_0, r)$ 为大气透过率修正项，为雷达系统中高度 r_0 到 r 处的散射体之间的大气在波长 $\lambda_{R,N}$ 和 $\lambda_{R,WV}$ 的透过率的比值，可通过消光模式计算得到； C_{WV} 为水汽混合比的标定常数^[13-15]。

2 激光雷达系统

为了满足在户外长期探测大气气溶胶-水汽的时空变化，设计及构建了一台户外型全天时激光雷达系统，该系统示意图及外观如图 1 所示，其外形尺寸为 1.8 m×1.2 m×2 m (长×宽×高)；表 1 为该系统主要性能参数，其主要由发射单元、接收单元、后继单元、数据采集单元及辅助控制单元组成。

发射单元中，激光器采用 Nd:YAG 激光器，输出波长为二倍频 532 nm 和三倍频 355 nm，其能量分别为 88 mJ 和 50 mJ，重复频率均为 10 Hz。由于两波长

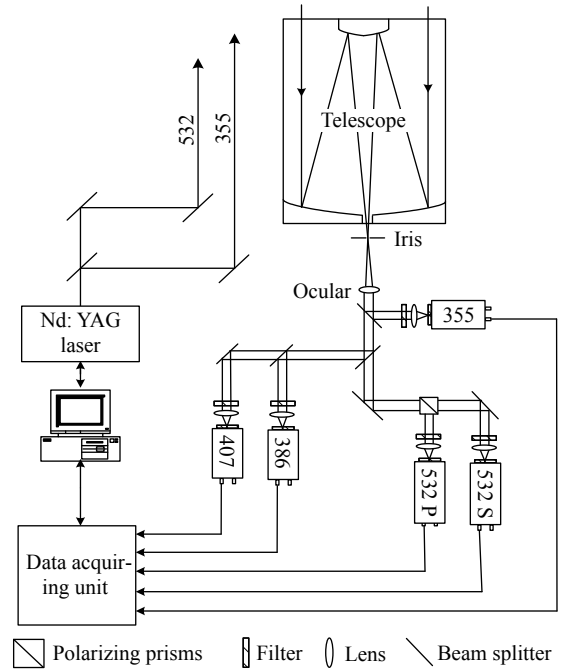


图 1 大气气溶胶-水汽激光雷达产品结构示意图

Fig.1 Structural schematic of lidar system for atmospheric aerosol-water vapor

表 1 大气气溶胶-水汽激光雷达系统的主要参数、性能指标

Tab.1 Main specifications, performance parameters of lidar system for atmospheric aerosol-water vapor

Parameters	
Wavelength/nm	532/355
Frequency/Hz	10
Monopulse energy/mJ	88/50
Telescope diameter/mm	400
Field of view/mrad	0.5-2(adjustable)
Detection channel	5 (355 nm, 532 nm S, 532 nm P, 386 nm and 407 nm)
Filter bandwidth/nm	1
Capture card	A/D and photon counting
Performance	
Measuring distance	0-12 km(atmosphere of clear sky)
Spatial resolution	7.5 m
Time resolution	15 min(adjustable depending on the measurement content)
Operation temperature	5- -40 °C(-10- -40 °C under the condition of peripheral temperature control)
Storage temperature	5- -70 °C(-30- -70 °C under the condition of peripheral temperature control)
Way of working	Manual, automatic and network control
Power supply	220 V/50 Hz/1 500 W
Volume	1.8 m×1.2 m×2 m(L×W×H)

从一个出光口射出,故采用高稳定的光学调整架及分束镜将两波长分离开,再利用反射镜和高稳定光学调整架将两波长反射到大气中,来调节发射光轴与接收光轴并保持高度的平行。由于出射光束小于 13 mm,故所有的发射单元镜片采用 1 in (1 in=2.54 cm) 的圆形镜片。

接收单元主要由望远镜、小孔光阑及目镜组成。望远镜采用卡塞格林望远镜,有效口径为 400 mm,并在其系统焦点处安装具有可调节的小孔光阑,来实现 0.5~2 mrad 范围内调节,适用于不同环境和弱信号探测的要求;通过小孔光阑的汇聚光经过焦距为 100 mm 的目镜将其准直为平行光用于后继光学单元探测。

后继光学单元光路设计优化是提高探测灵敏度的关键技术之一,其稳定性直接关系到探测信号是否完全被探测器所接收。首先对后继单元设计进行优化的原则:弱信号光程要短;分束片使用高性能的镀膜,增加反射和透射效率;通过分束片尽可能采用反射方式等,设计出的后继光路如图 1 所示;然后对后继单元进行结构设计,将所有分束片采用矩形,安装结构采用三角结构,基频远大于 200 Hz,结构稳定性高,如图 2(a)所示,并通过高精度的插槽方式固定于一体化的后继光学结构中,如图 2(b)所示,其基频远大于 200 Hz,稳定性高。



(a) 三角结构 (a) Triangular structure (b) 一体化结构 (b) Integrated structure

图 2 分束片安装结构

Fig.2 Beam splitter mounting structure

后继探测单元由 5 个探测通道组成,其中 3 个米散射探测通道分别用于探测 355 nm 出射波

长与气溶胶粒子相互作用产生的米散射信号及 532 nm 的米散射型号垂直分量和水平分量,2 个拉曼探测通道分别用于 355 nm 出射波长与氮气分子相互作用产生的 386 nm 拉曼散射信号和与水汽分子相互作用产生的 407 nm 拉曼信号。均采用探测器 PMT,在每个探测器前安装 1 nm 的干涉滤光片来滤除背景光;以及安装会聚透镜,安装完成如图 3 所示。

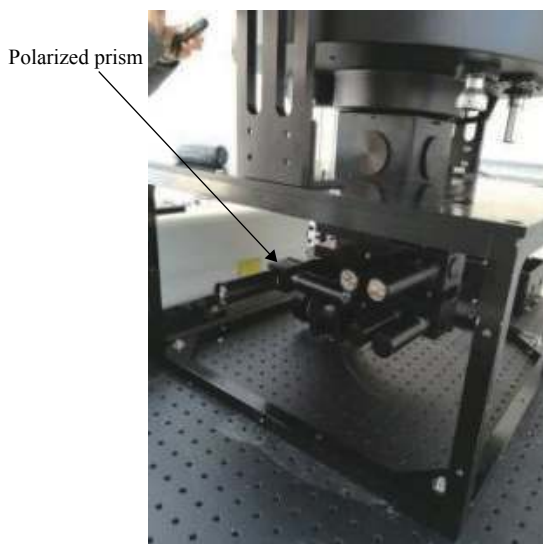


图 3 后继探测单元

Fig.3 Subsequent detection unit

数据采集单元主要用于采集探测器转换的电信号,其采集系统采用模数转换 A/D (采样精度为 12 bits) 和光子技术 PC (最高计数率为 250 MHz) 相结合的数据采集器,空间分辨率为 7.5 m。

系统的辅助控制单元主要有以下几种功能:

- (1) 利用工控机来确保发射信号与数据采集同步进行;
- (2) 利用全自动反演软件,无需人为干预便可获得反演后的数据,如不同波长的距离订正回波信号、退偏振比以及水汽等数据获取,可快速直观地描述大气垂直分布的时空变化特征,同时,与自动测量程序相结合,可实现无人干预条件下的自动测量和数据反演;
- (3) 利用设计控制软件可实现对雷达系统方舱进行温度、湿度的自动控制、一键启动、远程数据传输及应急保护等功能。

3 探测结果与数据分析

3.1 大气气溶胶探测结果分析

2019 年年初,合肥出现了严重的污染天,运用拉曼-米散射激光雷达对 2019 年 1 月份合肥地区上空大气进行了探测,一次探测累积时间为 15 min。

3.1.1 污染天探测结果与分析

测量时间为 2019 年 1 月 19 日 23:00,根据气象数据可知,此时 AQI 为 237, $PM_{2.5}$ 为 $187 \mu\text{g}/\text{m}^3$,为重度

污染天。图 4 为实际探测的 355 nm 和 532 nm (P 和 S) 波长的距离平方信号 (RSCS)(实线),及其导数(虚线),两波长回波信号随高度变化趋势相同。图 5 为根据图 4 的数据反演出的消光系数、Angstrom 指数特性及 532 nm 的退偏振比。由于当时天气为重度污染,且出现低层薄云,影响了系统探测距离。由图 4、图 5 可以明显看出,分别在高度 1.75 km、3 km 以及 3.6 km 处出现薄云。

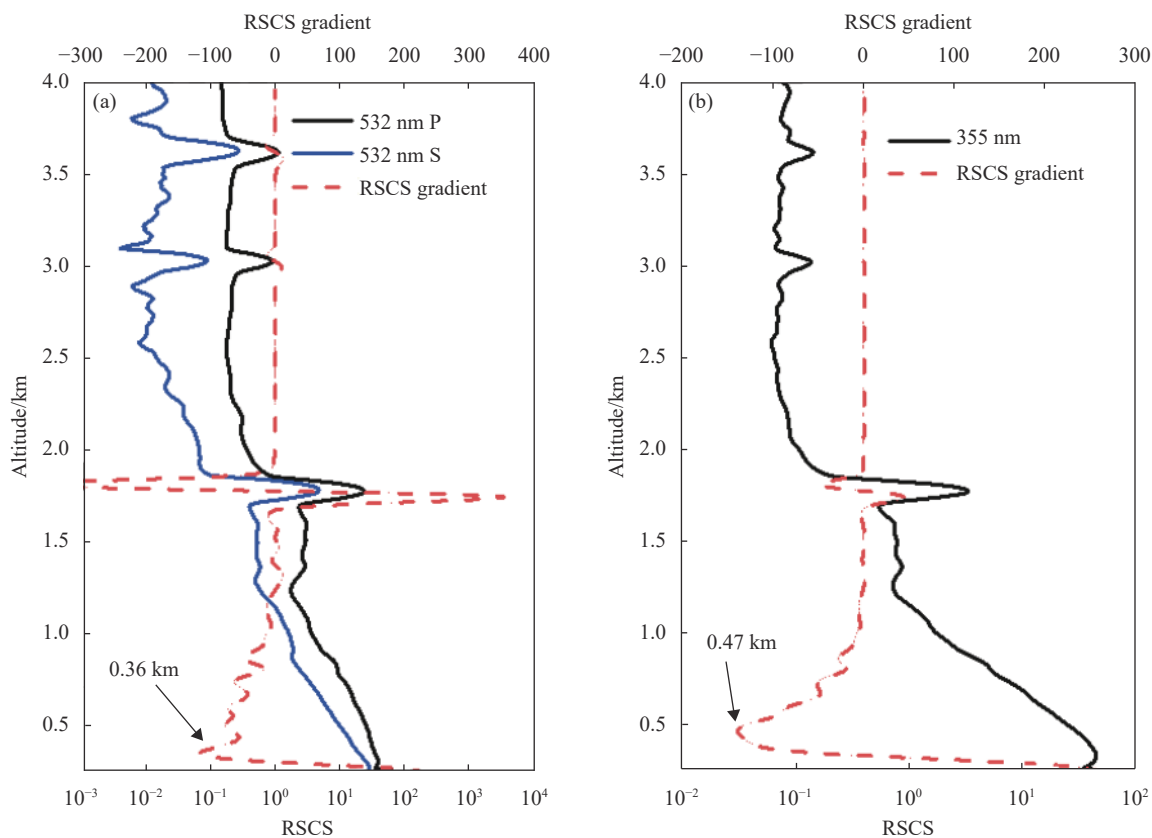


图 4 重度污染混合层高度

Fig.4 Mixed-layer height in the heavy pollution conditions

由图 4 可知,重度污染天的混合层高度很低,对两波长回波信号进行一阶求导,计算出混合层高度分别为 0.47 km (355 nm), 0.36 km (532 nm),这是由于两波长所受气溶胶分布特征影响不同,从而导致两波长计算处理的混合层高度不同。

由图 5 可知,重度污染天消光系数较大,两波长的消光曲线具有良好的一致性。利用消光系数

计算出的 Angstrom 指数在 -2.5~3.8 之间变化,退偏振比在 0~0.11 之间变化。1.25 km 以下的污染层: Angstrom 指数在 0.8~1.8 之间变化,说明在底层气溶胶存在较多的直径为 $1 \mu\text{m}$ 的粗粒子,且在 0.5~1.25 km 基本保持不变,说明该区域气溶胶粒子均匀混合。退偏振比在 0.03~0.11 之间变化,随着高度不断增加而减小,但在 0.7~1.25 km 发生突变,峰值达

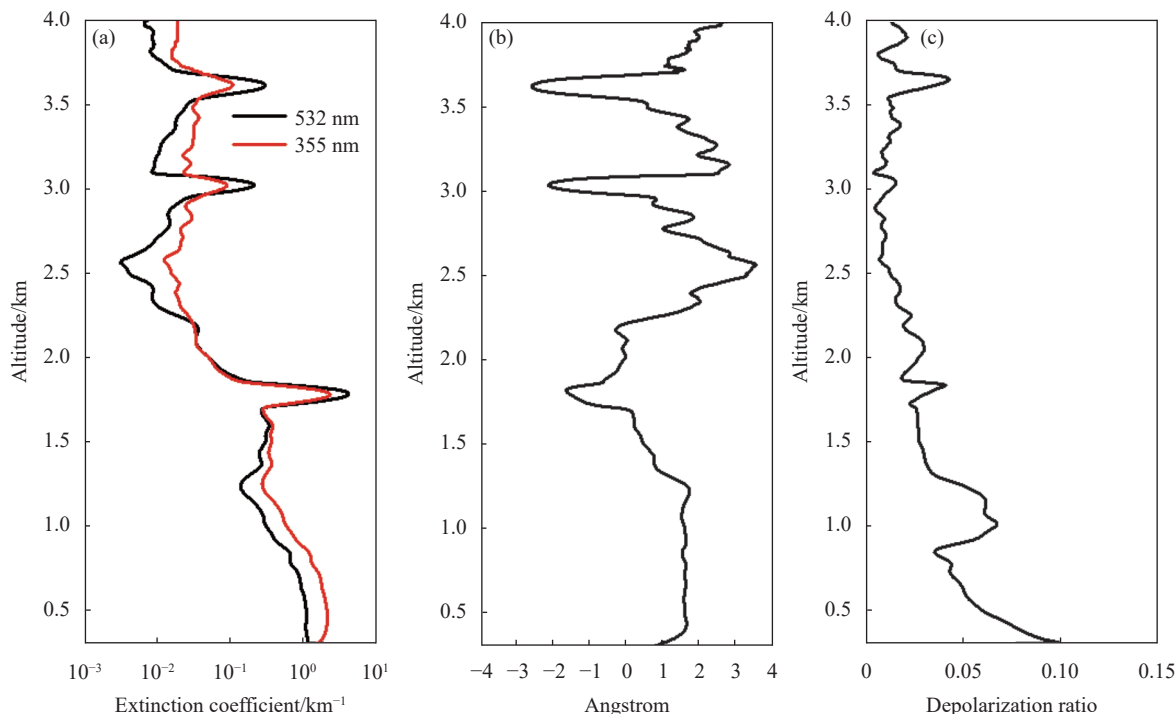


图 5 重度污染天的消光系数 (a)、Angstrom 指数 (b) 及退偏振比 (c)

Fig.5 Extinction coefficient (a), Angstrom index (b) and depolarization ratio (c) in the heavy pollution conditions

到 0.07, 整个污染层主要以球形粒子污染物为主。在高度 1.75 km、3 km 以及 3.6 km 处云层中, 两波长消光系数进入云层后数值大小发生反转, 对应计算出的 Angstrom 指数出现较大的波动, 并出现负值, 说明在云层中粒子半径较大; 对应的退偏振比都在 0.05 以下, 属于水云。

3.1.2 干净天探测结果与分析

测量时间为 2019 年 1 月 26 日 13:00, 根据气象数据可知, 此时 AQI 为 24, PM_{2.5} 为 14 μg/m³, 为一级优天。利用激光雷达系统探测到的 RSCS 及其导数, 如图 6 所示。根据探测数据反演得到消光系数、Angstrom 指数特性及 532 nm 的退偏振比, 如图 7 所示。由图 6、图 7 可知, 在 8 km 处出现卷云。

由图 6 可知, 355 nm 和 532 nm 信号得到的混合层高度为 1.1 km, 这是由于在一级优天条件下, 在混合层内气溶胶分布特征对两波长影响近似。

由图 7 可知, 在一级优天的条件下, 两波长在底层反演得到的消光系数远小于重度污染天的消

光系数。根据 Angstrom 指数曲线可知, 底层气溶胶的 Angstrom 指数比重度污染天要大, 说明在一级优天条件下, 底层大气中气溶胶粒子半径比重度污染天的小。根据退偏振比曲线可知, 底层气溶胶在这两种天气下的退偏振比都在同一范围内 (0~0.11), 说明两种天气底层气溶胶以球形粒子为主。在 1.7 km 以下, Angstrom 指数随着高度增加而呈现增加的趋势, 说明气溶胶粒子半径随高度的增加而呈现减小的趋势。在 1.7~3.9 km 高度下, Angstrom 指数随着高度增加而不断减小, 最小值到达 0.88, 且退偏振比不断增加, 最大值达到 0.047, 说明气溶胶粒子半径随高度的增加而增加, 且在 3.9 km 处气溶胶层以直径为 1 μm 的粗粒子的球形粗粒子为主。在 8 km 处, 卷云的两波长消光系数数值发生反转; 对应的 Angstrom 指数波动较大, 且出现负值, 说明在云层中粒子半径较大; 对应的退偏振比峰值到达 0.2, 介于水云和冰晶云之间, 属于混合云。

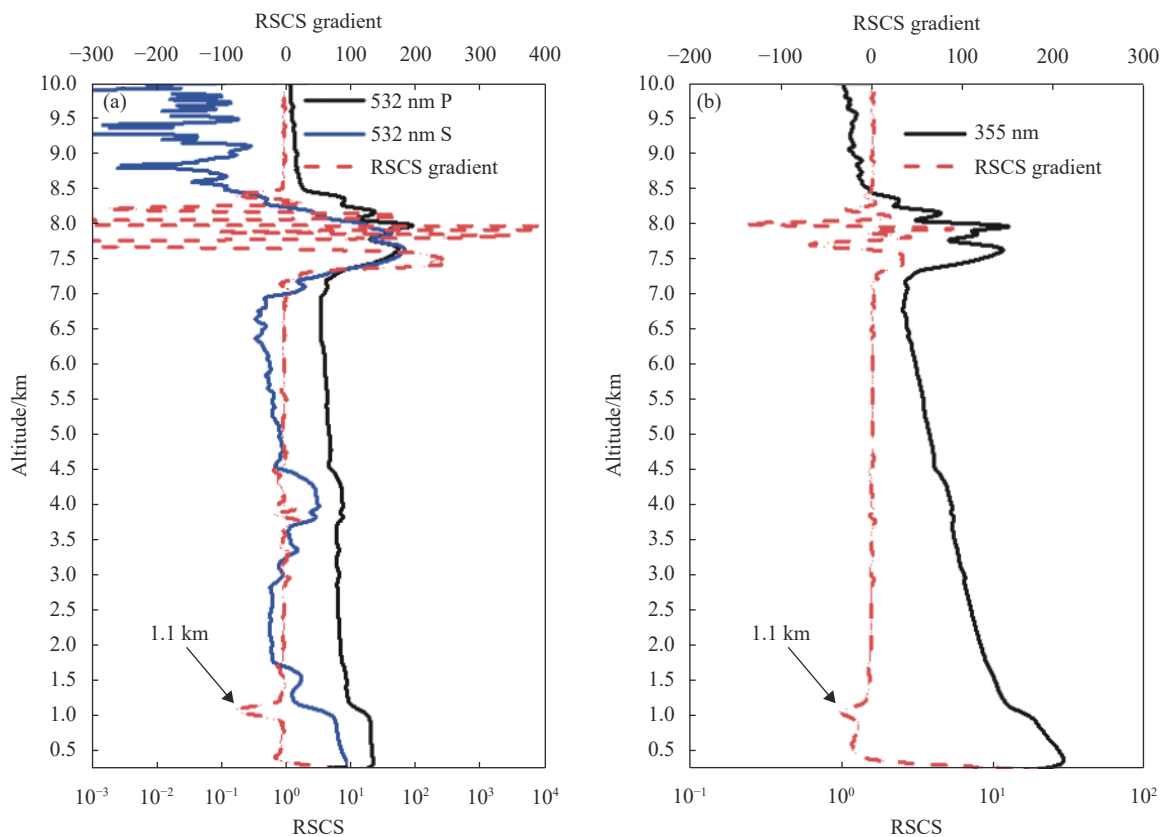


图 6 干净天混合层高度

Fig.6 Mixed-layer height in the clean weather conditions

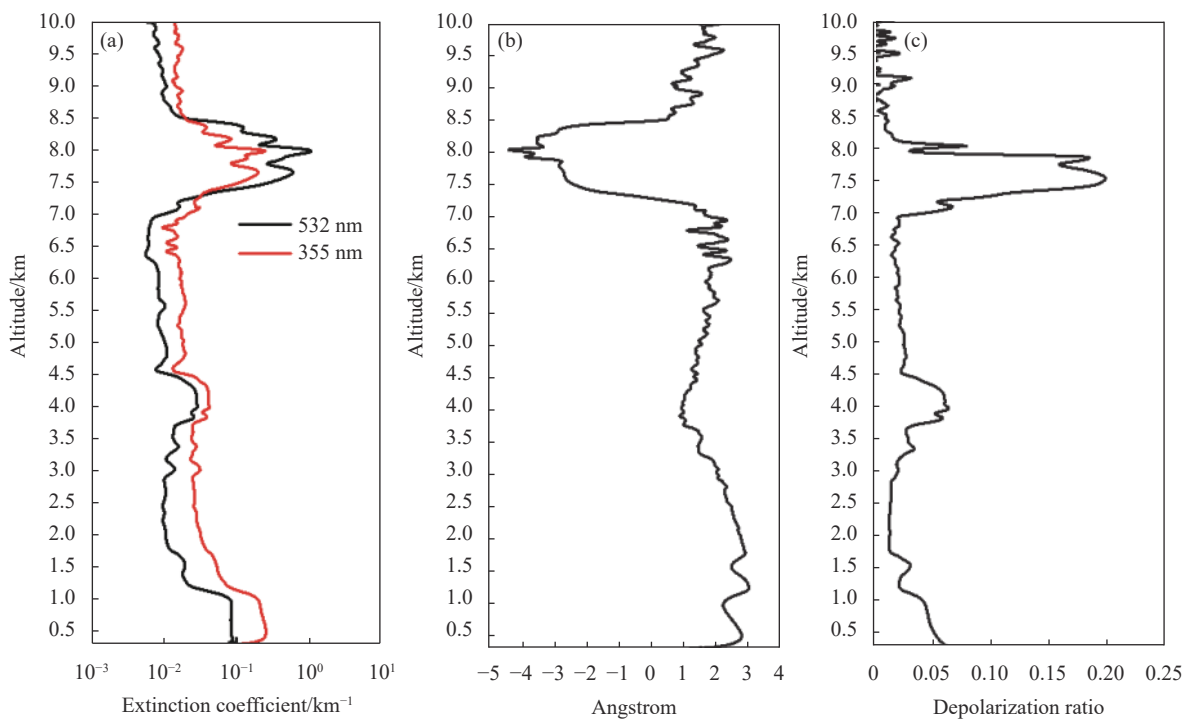


图 7 干净天的消光系数 (a)、Angstrom 指数 (b) 及退偏振比 (c)

Fig.7 Extinction coefficient (a), Angstrom index (b) and depolarization ratio (c) in the clean weather conditions

3.2 系统常数标定及水汽探测结果分析

3.2.1 系统常数标定

采用文献 [15] 研制的全固态紫外拉曼激光雷达

$$C_{WV} = \frac{\sum_{n(r_0)}^{n(r_1)} \frac{w_b(r)}{[P_{R,WV}(r, \lambda_{R,WV})/P_{R,N}(r, \lambda_{R,N})] \cdot [T(\lambda_{R,N}, r_0, r)/T(\lambda_{R,WV}, r_0, r)]}}{[n(r) - n(r_0) + 1]} \quad (9)$$

式中: $w_b(r)$ 为全固态紫外拉曼激光雷达系统获得的水汽混合比; $n(r_0)$ 和 $n(r_1)$ 分别为高度 r_0 和 r_1 处对应的数据点数。

利用全固态紫外拉曼激光雷达系统对文中所设计的拉曼-米激光雷达进行系统标定, 标定时间为 2020 年 11 月 20 日 01:45, 根据气象数据可知, 此时 AQI 为 64, $PM_{2.5}$ 为 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 该天空气质量良好。由

系统探测的水汽混合比对文中研制的激光雷达进行标定, 获得标定常数 C_{WV} , 公式如下:

文献 [15] 提供的水汽混合比垂直分布如图 8(a)(实线) 所示, 在 5 km 左右出现比较厚的云, 使得 5 km 以上的数据迅速减小, 甚至出现负值, 这是由于信号没有穿透云层所致。综合考虑拉曼-米激光雷达的几何重叠因子的影响, 文中选择 0.5~3.5 km 的水汽混合比对拉曼-米激光雷达系统进行标定, 获得系统标定常数为 121。

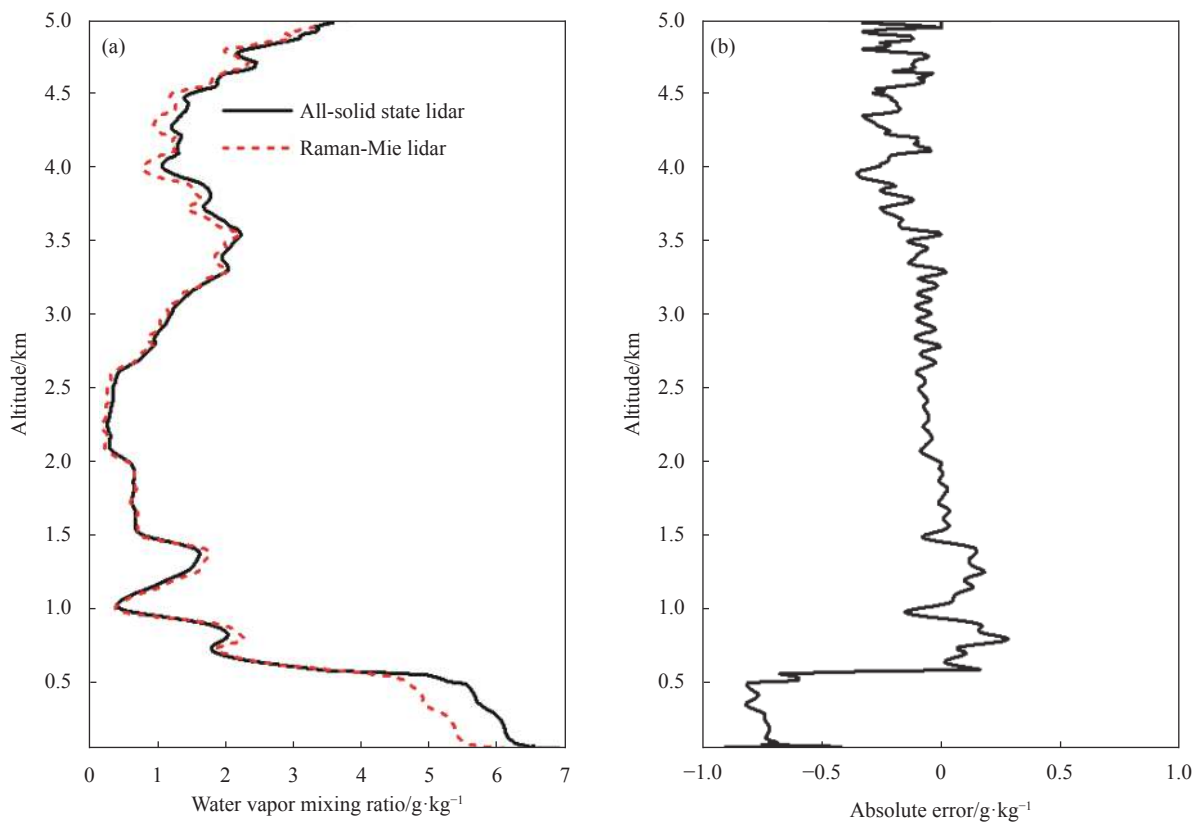


图 8 水汽混合比垂直分布特征及绝对误差廓线图

Fig.8 Profile of vertical distribution feature of water vapor mixing ratio and absolute error

拉曼-米激光雷达通过标定常数反演的水汽混合比, 如图 8(a)(虚线) 所示, 与全固态紫外拉曼激光雷达反演的水汽混合比, 如图 8(a)(实线) 进行对比, 两者探测结果大体一致, 水汽结果能较好地吻合。对比两者的绝对误差, 如图 8(b) 所示, 绝大部分的绝对误差在

$\pm 0.3 \text{ g}/\text{kg}$ 以内, 但由于几何重叠因子的影响导致在 0.5 km 以下误差较大。

3.2.2 水汽探测结果分析

测量时间为 2018 年 11 月 01 日 18:00 到 2018 年 11 月 02 日 16:00, 根据气象数据可知, 此时 AQI 平均

为 60, PM_{2.5} 平均为 40.5 μg/m³, 该天空气质量良好。图 9 给出了探测期间水汽混合比的连续时空分布, 垂直分辨率为 7.5 m, 时间分辨率为 15 min。

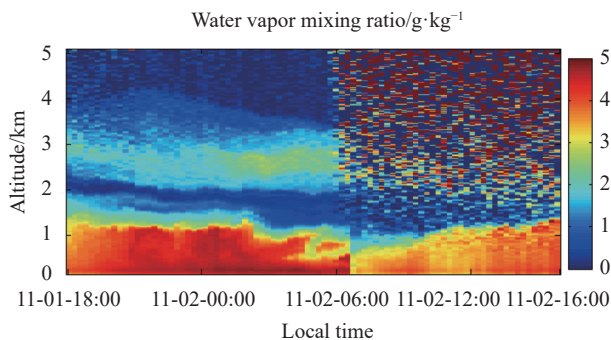


图 9 水汽混合比时空分布

Fig.9 Spatiotemporal distribution of water vapor mixing ratio

由图 9 可知, 夜晚测量探测高度可达 5 km, 白天由于背景太强, 导致水汽混合比探测高度只有 1.4~2 km。在夜晚探测期间, 在 2.5 km 左右有明显的水汽层, 随着时间的变化, 峰值从 1.5 g/kg 增加到 3 g/kg, 由于信噪比低, 该水汽层在白天探测不到。水汽主要分布在 1.5 km 以内, 夜晚底层水汽混合比大部分在 4~5 g/kg 之间变化, 白天水汽混合比大部分在 3~4 g/kg 之间变化, 且夜晚底层水汽混合比要比白天高。由此表明, 拉曼-米激光雷达系统可以实时、连续、精确探测大气中的水汽含量。

4 结 论

研制了一款用于连续探测大气气溶胶和水汽的激光雷达系统。不同于传统的大气气溶胶和水汽激光雷达, 该系统同时具备 355 nm/532 nm 波长米散射探测、532 nm 退偏振探测、氮气和水汽分子拉曼探测的功能。两波长米散射探测功能可以精细探测大气边界层结构、大气气溶胶和云的消光特性及粗细粒子分布; 532 nm 退偏振探测功能可反映出大气气溶胶粒子和云粒子的形状特征, 可识别出球形粒子(水云、污染型气溶胶和雾霾)和非球形粒子(沙尘与冰晶云等); 氮气和水汽分子拉曼探测功能可获得水汽混合比的时空分布特征。该系统后继探测单元采用高稳定性的一体化结构, 配置方舱具备防尘防水的恒温功能, 可以直接在户外长期探测, 有利于对局部气溶胶粒子和云粒子、水汽等物理参数间进行统计分析, 已

用于大气环境监测和科学等研究领域。

参考文献:

- [1] Han Yong, Wang Tijian, Rao Ruizhong, et al. Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 7396-7407. (in Chinese)
- [2] Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, et al. Raman Lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328004. (in Chinese)
- [3] Whiteman D N. Examination of the traditional raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2593-608.
- [4] Shang Zhen, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1211003. (in Chinese)
- [5] Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, et al. Mobile lidar system for measuring tropospheric aerosol and water vapor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 365-368. (in Chinese)
- [6] Lv Weiyu, Yuan Ke'e, Wei Xu, et al. A mobile lidar system for aerosol and water vapor detection in troposphere with mobile lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0330001. (in Chinese)
- [7] Tan Min, Wang Bangxin, Zhuang Peng, et al. Study on atmospheric temperature and water-vapor mixing ratio based on raman lidar [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(5): 1397-1401. (in Chinese)
- [8] Tan Min. Study on spatial and temporal distribution and data analysis of aerosol and water vapor under pollution conditions[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [9] Di Huige, Hou Xiaolong, Zhao Hu, 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): 244-251. (in Chinese)
- [10] Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, et al. Development of three-wavelength-raman-polarization lidar system and case study [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] Chen Tao, Wu Decheng, Liu Bo, et al. A new method for determining aerosol backscatter coefficient boundary value in the lower troposphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6):

- 1531-1536. (in Chinese)
- [13] Deng Qian, Wu Decheng, Kuang Zhiqiang, et al. 532 nm/660 nm dual wavelength lidar for self-calibration of water vapor mixing ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1230004. (in Chinese)
- [14] Wu D, Wang Z, Liu D, et al. Independent calibration of water vapor Raman lidar by using additional elastic measurements at water vapor Raman wavelength [C]//EPJ Web of Conferences EDP Sciences, 2016, 119: 25007.
- [15] Deng Qian. Research on self-calibration method of Raman Lidar water vapor detection and development of all-solid-state system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)

Raman-Mie scattering lidar system for detection of aerosol and water vapor in the atmosphere

Li Lu^{1,2}, Xing Kunming^{2*}, Zhao Ming², Deng Qian², Wang Bangxin^{2,3}, Zhuang Peng², Shi Yun¹

(1. Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China;

2. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract:

Objective With the development of society and economy, environmental problems are becoming more and more serious. The environmental protection and meteorological departments pay more and more attention to obtaining atmospheric parameters (such as aerosol, water vapor, temperature, etc.). The accuracy of weather forecast can be improved by continuously detecting atmospheric aerosols and water vapor. It is of great scientific significance to study the characteristics and diffusion mechanism of atmospheric pollution aerosols, the formation of clouds, rainfall and so on. As an active remote sensing tool, lidar has better temporal and spatial resolution and continuity than traditional atmospheric detection methods, and plays an important role in the measurement of atmospheric parameters. With the development of lidar technology, the development of lidar is towards miniaturization, production and simplification. In order to meet the requirement of environmental protection department to know the atmospheric parameters in time, an outdoor all-weather atmospheric aerosol-water vapor lidar has been developed by the key laboratory of atmospheric optics of the Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics to long-term detection of aerosols and Chinese Academy of Sciences.

Methods All-weather outdoor lidar system with emission wavelengths of 355 nm and 532 nm is designed and established for detecting atmospheric aerosols and water vapor. Adopting the existing mature technology of Mie-scattering of 355 nm and 532 nm, polarization of 532 nm, Raman lidar remote sensing of nitrogen and water vapor molecules, the lidar system is used for automatic continuous detection of planetary boundary layer, tropospheric aerosol particle and cloud particle optical characteristics and their morphology, water vapor mixture ratio. The lidar structure is compact and convenient for transportation with remote operation, data transmission, one-touch button functions.

Results and Discussions The system is used to detect atmospheric aerosols and water vapor, the detection results show that the mixed-layer depth is lower under heavy pollution conditions than that of the clean weather conditions. The mixed-layer depth is below 0.5 km in the heavy pollution days, while in clean days are around 1 km. Through the analysis of extinction coefficient, Angstrom index and depolarization ratio, it can be seen that the bottom atmospheric aerosol is dominated by spherical coarse particle pollutants under heavy pollution conditions, and spherical fine particle pollutants under clean weather conditions. In the cloud layer, the Angstrom

index is significantly reduced to a negative value, indicating that the cloud particle radius is large. In the process of water vapor detection, the system calibration constant obtained by the self-calibration method is 121. Compared with the calibrated lidar system, the error is within ± 0.3 g/kg for the water vapor mixing ratio. The continuous detection results show that the water vapor content within 5 km at night and the mixed-layer during the day can be detected.

Conclusions Unlike the traditional atmospheric aerosol and water vapor lidar, the system has the functions of 355 nm and 532 nm wavelength Mie-scattering detector, 532 nm depolarization detector, and Raman detector for nitrogen and water vapor molecules. The two-wavelength Mie-scattering detection function can detect the structure of atmospheric boundary layer, the extinction characteristics of aerosol and cloud, and the distribution of coarse and fine particles. The 532 nm depolarization detection function can reflect the shape characteristics of aerosol and cloud particles, and can recognize spherical particles (water cloud, pollution aerosol and haze) and non-spherical particles (sand dust and ice crystal cloud). The Raman detection function of nitrogen and water vapor molecules can obtain the spatial-temporal distribution characteristics of water vapor mixing ratio. The following detection unit of the system adopts a high-stability integrated structure, and the shelter is equipped with the constant temperature function of dust-proof and water-proof, so it can be directly detected in the open air for a long time, it is useful for statistical analysis of physical parameters such as local aerosol particles, cloud particles and water vapor, and has been used in research fields such as atmospheric environmental monitoring and science.

Key words: lidar; aerosol; water vapor mixture ratio; extinction coefficient; Angstrom exponent; depolarization ratio

Funding projects: Key Project of Natural Science Research Department of Education of Anhui Province (KJ2021A0945); High-Level Personnel Project of West Anhui University (WGKQ2022013, WGKQ2022015); Key Support Project of Hefei Institutes of Physical Science of the Chinese Academy of Sciences During the 13th Five-Year Plan (KP-2019-05); The Strategic Pilot Science and Technology Project of the Chinese Academy of Sciences (XDA17040524); Major Science Technology Project of Anhui Province in 2019 (201903C08020013).