

差分吸收激光雷达系统探测背景大气 SO₂ 和 NO₂

胡顺星¹, 陈亚峰^{1,2,*}, 刘秋武^{1,2}, 孙培育^{1,2}, 黄见¹, 杨杰^{1,2}, 王杰^{1,2}, 刘琳琳^{1,2}

¹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;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 研制了一套可用于探测背景大气 SO₂ 和 NO₂ 的差分吸收激光雷达系统。该系统利用两台 Nd:YAG 激光器的二倍频和三倍频产生 532 nm/355 nm 的激光, 分别去抽运四台窄线宽的染料激光器, 从而获得测量大气 SO₂ 和 NO₂ 分布所需的两对激光波长 300.05 nm/301.5 nm 和 446.6 nm/448.1 nm。实验数据表明, 在晴朗的天气条件下, 当空间分辨率为 15 m 且积分时间为 30 min 时, 大气 SO₂ 和 NO₂ 的测量精度分别可达 $\pm 2.0 \times 10^{-9}$ 和 $\pm 5.0 \times 10^{-9}$, 激光雷达探测的大气 SO₂ 和 NO₂ 平均浓度与当地气象部门同时间报告的浓度较一致, 显示了差分吸收激光雷达技术监测低浓度 SO₂ 和 NO₂ 时空分布的能力。

关键词 光谱学; 光学遥感; 染料激光光源; 差分吸收激光雷达; 大气 SO₂; 大气 NO₂

中图分类号 P412.291

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0911009

Differential Absorption Lidar System for Background Atmospheric SO₂ and NO₂ Measurements

Hu Shunxing¹, Chen Yafeng^{1,2,*}, Liu Qiuwu^{1,2}, Sun Peiyu^{1,2}, Huang Jian¹,
Yang Jie^{1,2}, Wang Jie^{1,2}, Liu Linlin^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A differential absorption lidar (DIAL) system has been developed for background atmospheric SO₂ and NO₂ measurements. Second harmonic and third harmonic (532 nm/355 nm) of two Nd:YAG lasers are used to pump four dye lasers, respectively. Two pairs of laser beams 300.05 nm/301.5 nm and 446.6 nm/448.1 nm are obtained for profiling atmospheric SO₂ and NO₂. Observation results show that accuracies of atmospheric SO₂ and NO₂ measurements under clear weather condition can be within $\pm 2.0 \times 10^{-9}$ and $\pm 5.0 \times 10^{-9}$, respectively, when spatial resolution is set to 15 m and integration time is set to 30 minutes. Averaged atmospheric SO₂ and NO₂ concentrations observed through SO₂/NO₂ DIAL conform with the results of meteorological department at the same time. It shows that DIAL technique has the ability to measure the space-time distribution of low concentration of SO₂ and NO₂.

Key words spectroscopy; optical remote sensing; dye laser source; differential absorption lidar; atmospheric SO₂; atmospheric NO₂

OCIS codes 300.1030; 010.1280; 010.1290; 280.1120; 280.1910; 280.3640

1 引言

大气 SO₂ 是最常见、最重要的污染物之一。自然界中的大陆架、沼泽、湿地洼地以及腐殖质释放的 H₂S, 在大气中能够氧化生成 SO₂, 火山爆发时也会

喷出大量 SO₂ 气体。SO₂ 的人为来源主要为工业生产和人类生活, 如工业用煤和燃料油中含硫物质的燃烧。在潮湿的大气中, SO₂ 气体在其他复合污染物的氧化作用下生成 SO₃, 从而形成危害较大的酸雨。

大气 NO₂ 也是最常见、最重要的污染物之一,

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-05-18; 录用日期: 2018-06-04

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项(41127901)、国家自然科学基金(41575032, 41505019)

* E-mail: cyfustc@mail.ustc.edu.cn

其主要来源是自然生成和人类排放。自然生成的 NO₂ 主要来源于有机含氮化合物的燃烧产物,或者大气中氮气与氧气在雷电等极端条件下的化合物;人类工业生产活动以及大量内燃机排放的 NO,在空气中能够氧化生成 NO₂。燃煤的热电站中,大型燃气锅炉、重油锅炉的废气直接生成有害的 NO₂。一般城市上空的 NO₂ 体积分数不到 0.1×10^{-6} ,但在交通拥挤地段可高达 10^{-6} 。

背景大气即大气自然本底值,是指大气在没有污染的情况下,环境组成的各系统,如土壤、水体和大气等与环境污染有关的各种化学元素的含量,其反映了环境质量的原始状态。大气背景中的 SO₂ 和 NO₂ 浓度很低,一般为 10^{-9} 数量级,这要求测量背景大气 SO₂ 和 NO₂ 的仪器具有很高的灵敏度和测量精度。差分吸收激光雷达(DIAL)技术主要用于探测大气痕量气体,其在探测大气臭氧方面的技术较为成熟。SO₂ 和 NO₂ 的吸收光谱比较复杂,与大气中其他气体相比,其吸收截面较小,并且 SO₂ 和 NO₂ 污染气体主要分布在近地面,气溶胶对 DIAL 技术的影响比较大。所以利用 DIAL 技术探测大气中背景 SO₂ 和 NO₂ 的技术比较复杂。

由于大气环境对人类至关重要,随着 DIAL 技术的进步、完善和发展,DIAL 技术也被用于大气 SO₂ 和 NO₂ 的浓度测量中。Fredriksson 等^[1-2]报道了用于测量大气中 SO₂ 和 NO₂ 的可移动激光雷达系统,系统采用染料光源来获得激光波长对 448.1 nm/446.5 nm 和 300.05 nm/299.3 nm,并分别用来测量大气中的 NO₂ 和 SO₂ 浓度。Fujii 等^[3]报道了探测精度为 1×10^{-9} 的 SO₂ 激光雷达实验装

置。Fukuchi 等^[4]对 SO₂ 激光雷达系统的误差进行了详细的模拟和分析。Goers 等^[5]选取波长对 280.91 nm/282.72 nm 对大气中的 SO₂ 浓度进行了测量。Toriumi 等^[6]利用可调谐钛宝石激光做光源用于 NO₂ 差分吸收激光雷达。Kölsch 等^[7]报道了利用倍频技术和差分吸收激光雷达技术测量 NO 和 NO₂ 的研究工作。中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2000 年研制了一台基于可调谐钛宝石激光光源来测量大气气溶胶、臭氧、SO₂,以及 NO₂ 的激光雷达系统^[8],2003 年研制了基于拉曼激光光源测量大气 SO₂ 和 NO₂ 浓度的激光雷达系统^[9-10]。本文主要利用 SO₂/NO₂ 污染气体探测激光雷达来探测近地面低浓度污染气体的时空分布。参阅国内外学者研究论文借鉴本课题组以前的研究经验,优化系统设计参数,配置了先进的染料激光光源和四通道高速数据采集卡,研制出 SO₂/NO₂ 污染气体激光雷达,其空间分辨率为 15 m,SO₂ 和 NO₂ 测量精度分别为 $\pm 2 \times 10^{-9}$ 和 $\pm 5 \times 10^{-9}$ 。初期的阶段性研究结果已进行过总结^[11-12]。本文着重介绍该 SO₂/NO₂ 污染气体激光雷达的总体结构以及参数,给出经过长时间实践和完善的测量方法和数据分析方法以及 SO₂ 和 NO₂ 同时探测的结果。

2 系统描述

SO₂/NO₂ 差分吸收激光雷达主要由激光发射系统、光学接收系统、信号探测,以及控制系统等部分组成,整个系统位于方舱实验室内。该系统的结构框图如图 1 所示,系统主要技术参数如表 1 所示。

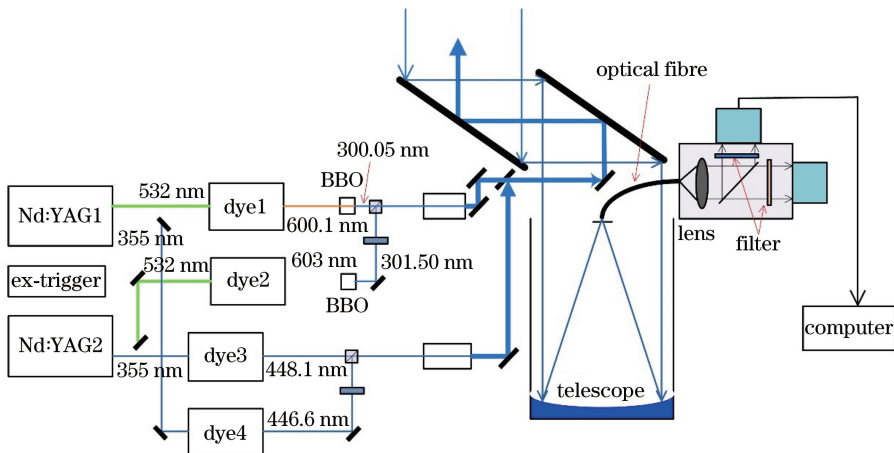


图 1 SO₂/NO₂ 污染气体激光雷达系统框图
Fig. 1 Schematic of SO₂/NO₂ DIAL system

表 1 SO₂/NO₂ 污染气体差分吸收激光雷达系统参数

Table 1 Specification of SO₂/NO₂ DIAL system

Unit	Specification	Parameter	
Laser	Nd:YAG laser energy /mJ	400(at 532 nm)	100(at 355 nm)
	Dye laser energy /mJ	95.2(at 600 nm)	10(at 448 nm)
	Second harmonic generation crystal	BBO (SO ₂) Type I $\theta=38.6^\circ, \Phi=30^\circ$	
Optical	Telescope diameter /mm	350	
Receiver	Focal length /mm, field of view /mrad	750,0.2~2	
Fiber	Diameter /mm, NA, transmission /%	1.2,0.22,99.9	
Filter	Aperture /mm, continuous wave /nm	25.4/300.75	25.4/447.45
	Full width at half-maximum /nm, peak transmission /%	3.00, 40(at 300 nm)	2.00,40(at 447 nm)
Signal	PMT	H10426-01(SO ₂)	H10426(NO ₂)
Detection	Effective area /mm	25	25
Data	AD conversion	PCI-9826H	
Acquisition	Digitizer rate /MHz	10	
Computer	CPU /GHz	3.2	

1) 探测原理。该雷达系统采用双波长差分吸收激光雷达技术来测量大气中 SO₂ 和 NO₂ 两种气体浓度。以 SO₂ 气体探测为例(NO₂ 气体探测同理),DIAL 激光雷达向大气中发射两束脉冲激光,其中一个激光波长位于待测气体 SO₂ 吸收光谱的吸收峰上,记为 λ_{on} ,大气中的 SO₂ 对该波长激光产生强烈的吸收效应;另一个激光波长位于吸收谷或者吸收峰的边翼上,记为 λ_{off} ,大气的 SO₂ 对该波长激光几乎不产生吸收或者吸收较弱。由于这两束激光波长相近,其他气体分子和气溶胶对于这两个波长的影响几乎相同,可以忽略不计。故而认为两束激光的回波信号强度的差异只是由待测气体分子 SO₂ 的吸收所引起,根据两个波长回波信号的强度差异就可以反演出待测气体 SO₂ 的分子数密度,其最终反演公式为^[11-12]

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta z[\sigma_{on} - \sigma_{off}]} \times \ln \frac{P(\lambda_{on}, z + \Delta z)P(\lambda_{off}, z)}{P(\lambda_{off}, z + \Delta z)P(\lambda_{on}, z)} + B - E_A - E_M, \quad (1)$$

式中 $N(z)$ 为待测气体分子数密度, P 为激光雷达回波信号, Δz 为差分距离, σ 为待测气体的吸收截面。 B 、 E_A 和 E_M 分别为大气后向散射作用项、大气气溶胶消光作用项和大气分子消光作用项,这三者统称为修正项。

2) 波长选择依据。对于差分吸收激光雷达系统来说,当待测气体浓度一定时,若想获得较大的吸收效应,就需要选择大的吸收截面差,另外还需要兼顾光源选择和其他气体的吸收效应^[12]。通过查询光谱吸收数据库,SO₂ 气体的可利用吸收截面主要

在 250.00~320.00 nm 范围内,在此范围内存在有规则的峰谷结构。在 300.00 nm 附近峰谷值相差较大,即吸收截面差最大,且考虑到本系统中染料激光器可以方便实现波长调谐,所以选择 $\lambda_{on}^S = 300.05$ nm 作为强吸收线,选择 $\lambda_{off}^S = 301.5$ nm 作为弱吸收线。同样,根据以上原则选择 NO₂ 气体的强、弱吸收波长分别为 $\lambda_{on}^N = 448.10$ nm 和 $\lambda_{off}^N = 446.60$ nm。经过计算,在以上波长范围内其他干扰气体吸收造成的误差均小于 8%^[11-12]。

3) 激光发射系统。该发射系统由两台大功率全固态 Nd:YAG 激光器 Continnum 8010、四台染料激光器 NarrowScan Dyes、扩束镜、大口径的三维扫描机构等主要部件组成^[13-14]。两台 Nd:YAG 激光器作为抽运源,在逻辑电路的控制下交替产生频率为 10 Hz 的激光脉冲,每台 Nd:YAG 激光器可以同时输出波长为 532 nm 和 355 nm 的激光。两束 532 nm 的激光交替抽运两台染料激光器分别产生 600.1 nm 和 603 nm 的激光,两束激光经过 BBO 晶体倍频,产生波长为 300.05 nm 和 301.5 nm 的激光,分别对应 SO₂ 的强吸收波长 λ_{on}^S 和弱吸收波长 λ_{off}^S ,两束光经过合束和扩束,导向望远镜上方的 45° 反射镜和三维扫描机构,最终射向大气用来测量 SO₂ 气体的浓度分布。同理,两束 355 nm 的激光脉冲交替抽运另外两台染料激光器,分别产生 446.6 nm 和 448.1 nm 的激光,分别对应 NO₂ 的弱吸收波长 λ_{off}^N 和强吸收波长 λ_{on}^N ,最终用来差分测量 NO₂ 气体的浓度分布。

4) 光学接收系统。接收系统主要包括有效通光口径为 350 mm 的近牛顿式望远镜和后继光路。四束激光在大气中传播,与大气气溶胶发生散射,其

后向散射信号被望远镜所接收并且会聚到焦点处。焦点处的光信号耦合进入传导光纤,然后进入后继光路。后继光路主要由准直镜、分色片、窄带滤光片、衰减片等组成。从光纤出来的光经过准直镜准直后,变为平行光到达分色片。分色片经过镀膜处理,可以将波长小于 350 nm 的光进行反射,将波长大于 350 nm 的光进行透射。经过分色片的反射光经过中心波长为 300.75 nm 的窄带滤光片,最终射向光电倍增管(PMT1)用来反演 SO₂ 气体的浓度分布;透射光经过中心波长为 447.5 nm 的窄带滤光片,射向光电倍增管(PMT2)用来反演 NO₂ 气体的浓度分布。

5) 信号探测和控制系统。由探测器及其电源, PCI-9826H 四通道高速数据采集卡,工控机及其显示设备,操控软件 and 数据分析软件等组成。四通道数据采集卡的通道 1 用于记录 PMT1 的信号,通道 2 用于记录 PMT2 的信号,通道 3 用于记录来自 Nd:YAG 激光器 1(或 2)的同步方波信号,其作用是识别通道 1 和通道 2 的回波信号波长,从而在后续数据反演中分辨出 on 信号与 off 信号^[12]。PMT 将通过窄带滤光片的光信号转变为电信号,被 PCI-9826H 高速数据采集卡采集,数字信号存入工控机存储并同步显示于计算机屏幕。控制软件采用友好的人机界面,可以实现系统参数设置和观测过程的控制。数据分析软件用于观测后的数据反演、演示和分析。

6) 方舱实验室。方舱实验室用来为整个雷达系统提供可靠、适宜的工作环境,并且可以实现污染气体差分吸收激光雷达的灵活部署和移动观测。方舱主要由温湿空调系统、电源系统、不间断电源(UPS)、冷却水制冷系统、空气除尘设施,以及减震元件等组成。方舱供电系统通过供电箱的分配,将三相电源按需分配给各个分系统。供电系统具有接

地、漏电缺相保护、稳压等保护功能。

3 测量方法和数据分析

两台 Nd:YAG 激光器以 10 Hz 频率交替出射抽运激光, 300.05 nm/301.5 nm 和 446.6 nm/448.1 nm 的回波信号频率均为 10 Hz。数据采集卡采样频率设置为 10 MS/s,对应的空间分辨率为 15 m。在晴朗的天气条件持续观测 1.5 h 以上,为了方便后续数据处理,设置每个数据文件采集时间为 60 s,即 1 min 有 600 个回波信号廓线,数据以二进制格式保存。长时间的数据积分可以减小测量误差,持续观测有利于保证数据的质量,减小由于大气抖动等因素引起的误差。

SO₂/NO₂ 污染气体激光雷达系统位于中国科学院大气物理研究所淮南研究院。2017 年 6 月 13 日在测量地点水平方向对周边的 SO₂ 和 NO₂ 气体进行了同时探测。测量时间为 19:48 到 22:47,原始数据的空间分辨率为 15 m。数据反演过程中,采用 10 min 回波信号的平均值来计算 SO₂ 和 NO₂ 廓线。为提高测量精度,一般 3 组(即 30 min)给出一个 SO₂ 和 NO₂ 平均浓度廓线[图 2(a)和图 3(a)],6 min 的方差作为测量结果的误差范围(棒)。误差范围(棒)的平均值作为该设备的测量精度[图 2(b)和图 3(b)],误差范围(棒)里边也包括了待测气体本身的浓度变化。可以看到,个别 SO₂ 或 NO₂ 廓线在某些距离处的反演结果存在较小的负值,可能是该距离处复杂气溶胶分布造成的影响。在测量的同时,记录了当地环保监测站点报告的 SO₂ 和 NO₂ 浓度,该数据用于与激光雷达的观测结果进行对比。对 SO₂ 数据进行整体分析,以 10 min 为时间分辨率的演化图如图 4 所示。以 10 min 为时间分辨率的水平方向大气 NO₂ 的演化图如图 5 所示。测量期间,激

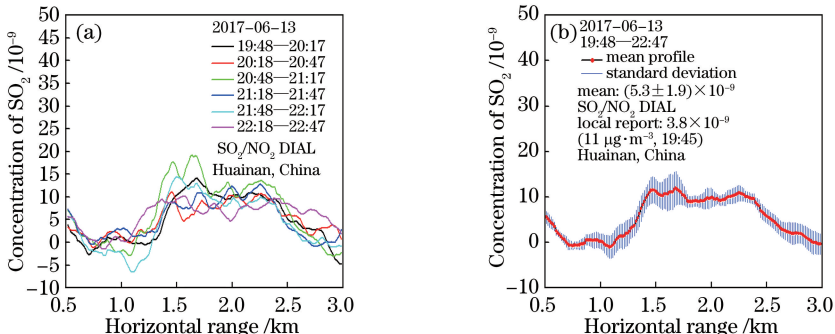


图 2 SO₂/NO₂ 污染气体激光雷达观测的(a) SO₂ 浓度廓线及(b)其平均分布
Fig. 2 (a) Concentration profiles of SO₂ and (b) its mean profiles measured by SO₂/NO₂ DIAL

光雷达探测的 SO_2 的平均浓度为 $(5.3 \pm 1.9) \times 10^{-9}$, 当地环保监测站报告的 SO_2 浓度为 3.8×10^{-9} ($11 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 两者相差 1.5×10^{-9} 。激光雷达探测的 NO_2 的平均浓度为 $(8.8 \pm 4.2) \times 10^{-9}$,

当地环保监测站给出的数据是 7.3×10^{-9} ($15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 两者相差 1.5×10^{-9} 。比较结果表明, 两者比较一致, 初步验证了 SO_2/NO_2 污染气体探测激光雷达探测数据是准确可靠的。

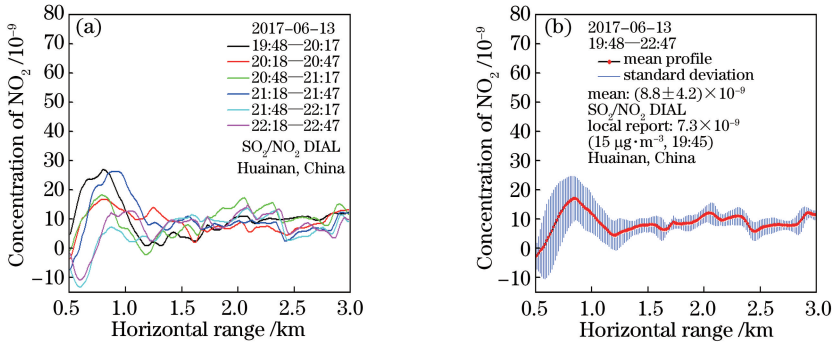


图 3 SO_2/NO_2 污染气体探测激光雷达观测的 (a) NO_2 浓度廓线及 (b) 其平均分布
Fig. 3 (a) Concentration profiles of NO_2 and (b) its mean profiles measured by SO_2/NO_2 DIAL

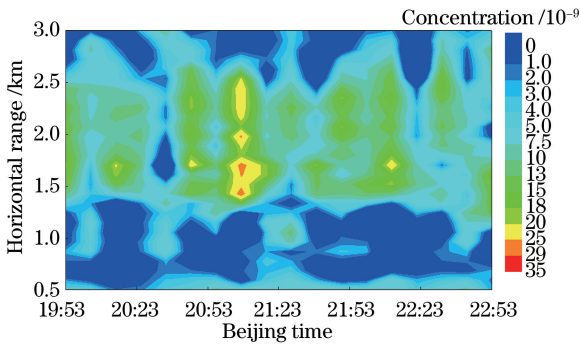


图 4 激光雷达测量 SO_2 的时间演化图
Fig. 4 Time evolution diagram of SO_2 measured by SO_2/NO_2 DIAL

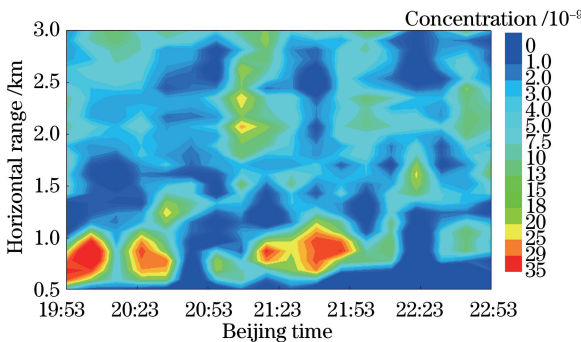


图 5 激光雷达测量 NO_2 的时间演化图
Fig. 5 Time evolution diagram of NO_2 measured by DIAL

用于测量大气 SO_2 (NO_2) 的激光束波长非常接近, 在气象状况稳定、能见度较高的大气条件下, 校正后的大气分子消光和气溶胶消光对测量结果影响非常小。测量结果的不确定度主要是回波信号的起伏引起统计误差。一般测量的积分时间愈长, 统计误差愈小。本系统的信号探测采用模拟电流 A/D 转换的方法, 评估测量结果不确定度可以采用标准方差,

标准方差的大小包含了统计误差和测量气体本身的浓度变化。采用不同的积分时间进行分组, 然后求出方差大小。图 6 给出了 SO_2 和 NO_2 探测数据的积分时间与平均标准方差的关系。可以看出, 平均标准方差随积分时间增加而减小, 如图 6(a) 中的 SO_2 测量, 当积分时间增加到 40 min 以后, 标准方差不再下降。经过以上分析可知: 在 SO_2/NO_2 激光雷达系统中, 当积分时间为 30 min 时, SO_2 的不确定度小于 2×10^{-9} , NO_2 的不确定度小于 5×10^{-9} 。因此, 该实验结果表明, SO_2/NO_2 污染气体激光雷达已经达到要求的指标: $\pm 2.0 \times 10^{-9}$ (SO_2), $\pm 5.0 \times 10^{-9}$ (NO_2), 测量精度比以前研制的基于拉曼光源的测污激光雷达有了显著的提高。

4 结 论

SO_2/NO_2 激光雷达采用 Nd:YAG 激光器抽运的可调谐染料激光器作为光源, 相对容易地获得探测大气 SO_2 和 NO_2 浓度的较为理想的激光波长对, 选择的波长对间隔小, 吸收光谱的吸收截面差比较大, 其他吸收气体影响小, 非常有利于克服混合层气溶胶的影响, 提高设备的探测精度。晴朗天气条件下的观测数据表明, 当测量空间分辨率为 15 m 且积分时间为 30 min 时, 大气 SO_2 和 NO_2 的测量精度(方差)分别可达 $\pm 2.0 \times 10^{-9}$ 和 $\pm 5.0 \times 10^{-9}$, 测量的有效距离可达 3.0 km。这显示了差分吸收激光雷达技术具有监测低浓度 SO_2 和 NO_2 空间分布及其时空变化的能力。如果将该技术用于监测高浓度 SO_2 和 NO_2 污染排放源时, 可以缩短积分时间和降低空间分辨率, 从而充分发挥设备的效能。

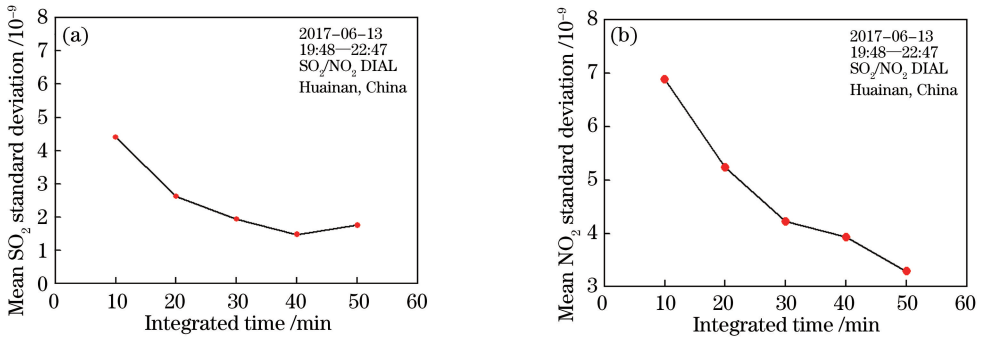


图 6 (a) SO₂ 和(b) NO₂ 探测数据的积分时间与平均标准方差的关系

Fig. 6 Relationship between integration time and its mean standard deviation in (a) SO₂ and (b) NO₂ DIAL measurements

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所潘蔚琳研究员在系统研制和实验观测过程中有关激光雷达技术的有益讨论。

参 考 文 献

[1] Fredriksson K, Galle B, Nyström K, *et al.* Mobile lidar system for environmental probing[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(24): 4181-4189.

[2] Edner H, Fredriksson K, Sunesson A, *et al.* Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(19): 4330-4338.

[3] Fujii T, Fukuchi T, Goto N, *et al.* Dual differential absorption lidar for the measurement of atmospheric SO₂ of the order of parts in 10⁹ [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(6): 949-956.

[4] Fukuchi T, Goto N, Fujii T, *et al.* Error analysis of SO₂ measurement by multiwavelength differential absorption lidar [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38 (1): 141-145.

[5] Goers U B. Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar ARGOS[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34 (11): 3097-3102.

[6] Toriumi R, Tai H, Takeuchi N. Tunable solid-state blue laser differential absorption lidar system for NO₂ monitoring[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35 (8): 2371-2375.

[7] Kölsch H J, Rairoux P, Wolf J P, *et al.* Simultaneous NO and NO₂ DIAL measurement using BBO crystals [J]. *Applied Optics*, 1989, 28 (11): 2052-2056.

[8] Zhang Y C, Hu H L, Tan K, *et al.* Development of a mobile lidar system for air pollution monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1025-1031.
张寅超, 胡欢陵, 谭锟, 等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制 [J]. *光学学报*, 2004, 24 (8): 1025-1031.

[9] Hu S X, Hu H L, Zhang Y C, *et al.* A new differential absorption lidar for NO₂ measurements using Raman-shifted technique [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(8): 435-437.

[10] Hu S X, Hu H L, Zhang Y C, *et al.* Differential absorption lidar for environmental SO₂ measurements [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9): 1121-1126.
胡顺星, 胡欢陵, 张寅超, 等. 差分吸收激光雷达测量环境 SO₂ [J]. *中国激光*, 2004, 31 (9): 1121-1126.

[11] Liu Q W, Wang X B, Chen Y F, *et al.* Detection of atmospheric NO₂ concentration by differential absorption lidar based on dye lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0428004.
刘秋武, 王晓宾, 陈亚峰, 等. 基于染料激光器的差分吸收激光雷达探测大气 NO₂ 浓度 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0428004.

[12] Chen Y F, Wang X B, Liu Q W, *et al.* Mobile SO₂ differential absorption lidar system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0701004.
陈亚峰, 王晓宾, 刘秋武, 等. 车载二氧化硫差分吸收激光雷达系统 [J]. *光子学报*, 2017, 46 (7): 0701004.

[13] Liu Q W, Chen Y F, Wang J, *et al.* Design and implementation of NO₂ differential absorption lidar source [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 433-439.
刘秋武, 陈亚峰, 王杰, 等. 差分吸收 NO₂ 激光雷达光源的设计与实现 [J]. *激光技术*, 2018, 42 (4): 433-439.

[14] Huang J, Hu S X, Cao K F, *et al.* Design of three dimensional scanning control system for air pollution monitoring lidar based on LabVIEW [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(2): 124-129.
黄见, 胡顺星, 曹开法, 等. 基于 LabVIEW 的测污激光雷达三维扫描控制系统的设计 [J]. *大气与环境光学学报*, 2013, 8(2): 124-129.