

基于染料激光器的差分吸收激光雷达 探测大气 NO₂ 浓度

刘秋武^{1,2}, 王晓宾^{1,2}, 陈亚峰^{1,2}, 曹开法¹, 胡顺星¹, 黄 见¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 研制了一台利用大气后向散射信号探测 NO₂ 浓度廓线的差分吸收激光雷达(DIAL)。用两台 Nd:YAG 激光器分别抽运两台染料激光器, 获得测量大气 NO₂ 浓度所需的波长分别为 λ_{on} 和 λ_{off} 的两束激光, 通过数据反演获得 NO₂ 浓度的水平和垂直分布。实验结果表明, 淮南大气科学研究所内大气垂直高度 0.4~3.0 km 范围内的 NO₂ 体积分数在 $0\sim 2.5\times 10^{-8}$ 范围内波动, 水平距离 0.4~3.0 km 范围内的 NO₂ 体积分数在 $0\sim 3.0\times 10^{-8}$ 范围内波动。

关键词 遥感; 大气光学; 差分吸收激光雷达; 染料激光器; NO₂

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0428004

Detection of Atmospheric NO₂ Concentration by Differential Absorption Lidar Based on Dye Lasers

Liu Qiuwu^{1,2}, Wang Xiaobin^{1,2}, Chen Yafeng^{1,2}, Cao Kaifa¹, Hu Shunxing¹, Huang Jian¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, 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 One differential absorption lidar (DIAL) for measuring NO₂ concentration profile is developed by using atmospheric backscattered signals. Two Nd:YAG lasers are used to pump two dye lasers to produce two laser beams with the wavelengths of λ_{on} and λ_{off} , respectively. Retrieval of acquired data provides the vertical and the horizontal distributions of NO₂ concentration. The experimental results show that the volume fraction of NO₂ at Huainan Institute of Atmospheric Sciences, fluctuates in the range from 0 to 2.5×10^{-8} in the atmospheric vertical height range of 0.4-3.0 km and 0 to 3.0×10^{-8} in the horizontal distance range of 0.4-3.0 km, respectively.

Key words remote sensing; atmospheric optics; differential absorption lidar; dye lasers; NO₂

OCIS codes 280.1910; 140.2050; 280.1120; 010.1290

1 引 言

二氧化氮(NO₂)是大气中一种重要的痕量气体,也是氮氧化合物的主要成分之一^[1]。化石燃料燃烧产生和汽车尾气排放的含氮物质主要成分为 NO,其在传输过程中容易受到氧化而转化为有毒性的 NO₂,NO₂对大气环境、植物生长、生态环境和人体健康都有很大的危害。NO₂也是形成酸雨、酸雾及光化学烟雾的主要污染物之一^[2]。环境监测部门将空气中的 NO₂ 含量作为空气质量指数(AQI)的评价指标之一。随着我国对煤、石油等能源的需求和汽车数量的日益增加,NO₂对环境的影响也越来越严重。因此,加强大气中

收稿日期: 2016-10-27; **收到修改稿日期:** 2016-12-27

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)

作者简介: 刘秋武(1975—),男,博士研究生,主要从事差分吸收激光雷达探测大气痕量气体方面的研究。

E-mail: qwliu@hstc.edu.cn

导师简介: 胡顺星(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事各种激光雷达大气探测方法和技术方面的研究。

E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn (通信联系人)

NO₂ 的浓度监测十分必要。

差分吸收激光雷达(DIAL)技术最早在 20 世纪 70 年代提出,用于测量大气水汽空间分布^[3]。DIAL 监测大气污染具有传统地基单点测量方法不具备的优点,可以对大范围的大气污染进行遥感监测,获得污染物的时空分布图。随着激光技术的发展,DIAL 探测 NO₂ 的技术得到发展和应用。Fredriksson 等^[4]用 Nd:YAG 激光器抽运染料激光器,作为可移动差分吸收激光雷达的光源,测量了硝酸盐化工厂烟囱及周边烟雾中的 NO₂ 浓度。Kölsch 等^[5]用准分子激光器抽运染料激光器并用偏硼酸钡(BBO)倍频晶体作为光源,同时测量模拟场地的 NO₂ 和 NO 浓度。Mori 等^[6]用 Nd:YAG 激光器抽运染料激光器,利用和频方法产生两个 448.20~446.80 nm 波长来测量大气中的 NO₂ 浓度。在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所利用拉曼频移的方法产生两个 395.60~396.68 nm 波长来测量大气中的 NO₂ 浓度^[7-9],中国工程物理研究院使用双通道可调谐的 Ti:蓝宝石激光器的一组波长测量了大气中的 NO₂ 浓度^[10]。

由于 NO₂ 在大气中含量低,吸收截面小,探测难度较大。为提高 NO₂ 探测精度和系统稳定性,并满足多波段多大气成分主动综合探测系统项目中大气 NO₂ 浓度分布的测量要求,中科院安徽光学精密机械研究所从 2012 年开始研制新一代测污差分吸收激光雷达^[11-12]。本文阐述了差分吸收激光雷达的探测原理,详细介绍了 NO₂ 差分吸收激光雷达的系统结构,并给出了探测 NO₂ 浓度分布的实验结果。

2 差分吸收激光雷达原理

差分吸收激光雷达选取两种对待测气体具有明显不同吸收截面的激光波长,利用待测气体对这两个激光波长吸收的显著差别来确定待测气体的浓度。差分吸收激光雷达向大气中同一光路发射两束波长接近的脉冲激光,其中一束激光的波长位于待测气体分子的吸收峰处,记为 λ_{on} ,另一束激光的波长位于待测气体分子的吸收谷或吸收峰外,记为 λ_{off} 。将这两个回波信号按弹性散射激光雷达方程进行比值反演,可确定传播路径上不同距离 z 处待测气体的分子数密度 $N(z)$ 为^[13-14]

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] + B - E_A - E_M, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}), \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right], \quad (3)$$

$$E_A = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_A(\lambda_{on}, z) - \alpha_A(\lambda_{off}, z)], \quad (4)$$

$$E_M = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_M(\lambda_{on}, z) - \alpha_M(\lambda_{off}, z)], \quad (5)$$

式中 $P(\lambda_{on}, z)$ 和 $P(\lambda_{off}, z)$ 分别为波长 λ_{on} 和 λ_{off} 在距离 z 处的激光雷达回波信号; $\sigma(\lambda_{on})$ 和 $\sigma(\lambda_{off})$ 分别为待测气体分子在波长 λ_{on} 和 λ_{off} 处的吸收截面, $\Delta\sigma$ 为对应的吸收截面差; B 为大气后向散射作用项; E_A 为大气气溶胶消光作用项; E_M 为空气分子消光作用项; $\beta(\lambda_{on}, z)$ 和 $\beta(\lambda_{off}, z)$ 、 $\alpha_A(\lambda_{on}, z)$ 和 $\alpha_A(\lambda_{off}, z)$ 及 $\alpha_M(\lambda_{on}, z)$ 和 $\alpha_M(\lambda_{off}, z)$ 分别为波长 λ_{on} 和 λ_{off} 在距离 z 处的大气后向散射系数、气溶胶消光系数和大气分子消光系数。

当 λ_{on} 和 λ_{off} 相差很小时,这两个波长与气溶胶相互作用引起的后向散射系数、气溶胶消光系数和分子消光系数基本相同, B 、 E_A 及 E_M 可忽略不计, (1) 式可简化为

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right]. \quad (6)$$

实际计算中,需要对(6)式进行差分运算,用 $z \sim z + \Delta z$ 之间的平均值作为 $N(z)$ 的测量值, Δz 称为差分距离,则(6)式可表示为

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta z \Delta\sigma} \ln \frac{P(\lambda_{on}, z + \Delta z) P(\lambda_{off}, z)}{P(\lambda_{off}, z + \Delta z) P(\lambda_{on}, z)}. \quad (7)$$

由(1)~(5)式可知,只有 λ_{on} 和 λ_{off} 接近时,大气后向散射系数 $\beta(\lambda_{on}, z) \approx \beta(\lambda_{off}, z)$ 、气溶胶消光系数 $\alpha_A(\lambda_{on}, z) \approx \alpha_A(\lambda_{off}, z)$ 及大气分子消光系数 $\alpha_M(\lambda_{on}, z) \approx \alpha_M(\lambda_{off}, z)$ 。因此, λ_{on} 和 λ_{off} 的间隔要尽可能小且

吸收截面差 $\Delta\sigma$ 要尽可能大,并尽量避开除待测气体外其他气体的吸收干扰。图 1(a)是 NO_2 在 235~665 nm 波段的光谱吸收截面^[15],在 440~450 nm 之间有几个峰值波长可用于差分吸收激光雷达测量,如图 1(b)所示。选用 $\lambda_{\text{on}}=448.1$ nm 和 $\lambda_{\text{off}}=446.6$ nm, NO_2 光谱吸收截面差 $\Delta\sigma=2.92\times 10^{-23}$ $\text{cm}^2/\text{molecule}$ 。

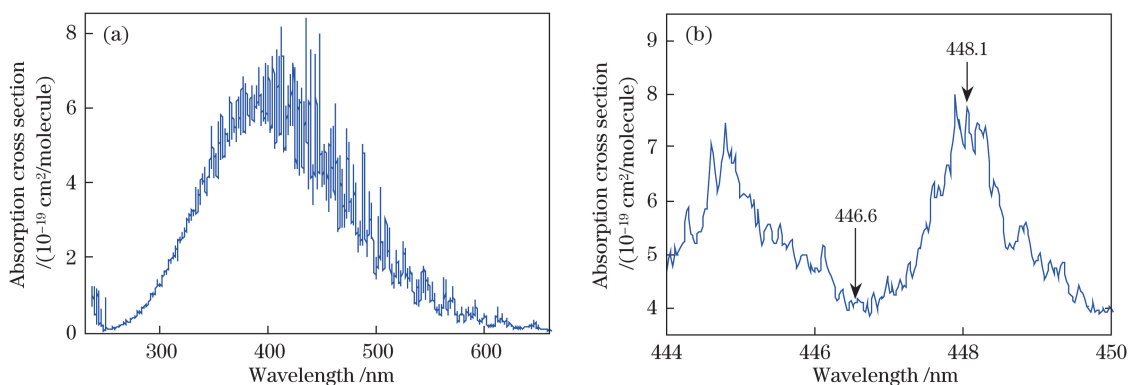
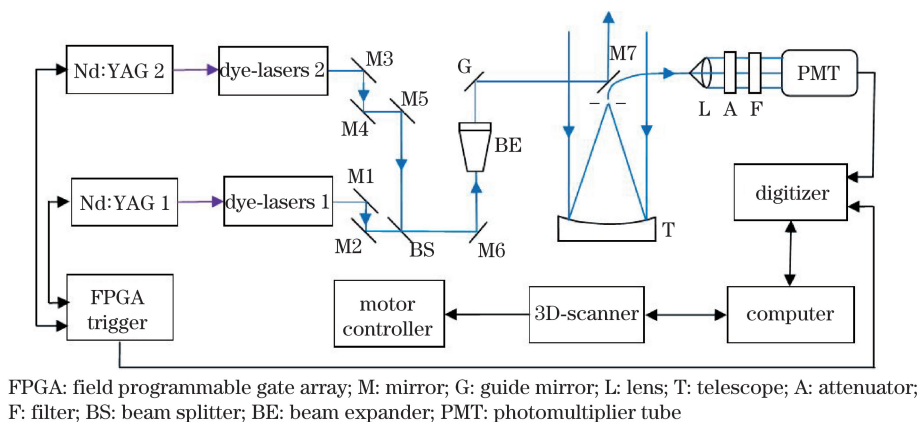


图 1 (a) 不同波长下 NO_2 的吸收截面;(b) 444~450 nm 波长间的放大图
Fig. 1 (a) Absorption cross sections of NO_2 under different wavelengths;
(b) enlargement in wavelength region from 444 nm to 450 nm

3 NO_2 差分吸收激光雷达系统结构

NO_2 差分吸收激光雷达系统主要由激光发射、回波接收、信号采集和时序控制三个单元组成,如图 2 所示。



FPGA: field programmable gate array; M: mirror; G: guide mirror; L: lens; T: telescope; A: attenuator; F: filter; BS: beam splitter; BE: beam expander; PMT: photomultiplier tube

图 2 NO_2 差分吸收激光雷达系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of DIAL system for NO_2 concentration measurement

3.1 激光发射单元

激光发射单元采用固体激光器抽运染料激光器的方式获得所需波长。固体激光器选用 Powerlite8010 型 Nd:YAG 激光器(Continuum 公司,美国),其基频光 1064 nm 先经倍频晶体产生 532 nm 波长的激光,再经三倍频后得到波长为 354.7 nm 的激光(能量为 150 mJ,脉冲宽度为 5~7 ns,重复频率为 10 Hz),将其作为染料激光器的抽运光。染料激光器为 NarrowScan 染料激光器(Radiant Dyes Laser 公司,德国),谐振腔带有光栅线数为 2400 line/mm、宽为 90 mm 的光栅,可使输出谱线的宽度为 0.06 cm^{-1} 。振荡级和预放级共用一个染料池,主放大级另用一个染料池。两个染料池均采用纯度为 99.5%(质量分数)的 RH 级乙醇作为溶剂,香豆素 450(C450)作为染料。抽运光激发染料 C450 发出的荧光经振荡腔内的光栅选频后输出种子光,通过透镜耦合进入预放染料池(与振荡级共用)进行预放大,再经扩束后由主放大染料池放大并输出,能量约为 12 mJ,脉冲宽度约为 10 ns,发散角约为 0.5 mrad。腔内的选频光栅由步进电机驱动,通过控制步进电机的转动角度,可得到所需波长。雷达的染料激光器 1 输出波长 $\lambda_{\text{on}}=448.1$ nm,染料激光器 2 输出波长

$\lambda_{\text{off}} = 446.8 \text{ nm}$ 。

染料激光器 1 输出 448.1 nm 光束通过全反射镜 M1、M2 后入射到分束镜 BS, 经 BS 反射后由反射镜 M6 反射、导向镜 G 改变方向后到达安装在望远镜 T 的全反射镜 M7, 并将此光路作为调整另一束激光 446.6 nm 光路的标准。染料激光器 2 输出 446.6 nm 的激光光束, 依次通过全反射镜 M3、M4 和 M5 后到达 BS, 经 BS 透射后经反射镜 M6、导向镜 G 到达全反射镜 M7。反复调整反射镜 M2、M5 和分束镜 BS 的调节螺栓, 使这两束激光经 BS 后合为一束光。在反射镜 M6 后加入扩束镜 BE, 将光束扩束至 24 倍后由反射镜 M7 反射进入三维扫描仪。调节导向镜 G 和反射镜 M7, 使两束发射光与接收望远镜同轴并通过三维扫描仪入射到大气中。

为实现对不同方位 NO_2 浓度的测量, 在激光发射和接收光路上装有大口径、高精密度三维扫描系统, 安装在实验舱的顶部。该系统由两块平行平面镜、传动蜗杆及起控制作用的步进电机组成。采用潜望式设计, 能进行俯仰和方位转动。方位扫描角度范围为 $-175^\circ \sim 175^\circ$, 垂直扫描角范围为 $-10^\circ \sim 115^\circ$ 。通过计算机改变三维扫描系统的方位和俯仰步进电机的转动角度, 实现对水平、垂直和不同斜程的 NO_2 浓度廓线测量。

3.2 回波接收单元

入射到大气中的激光光束与大气中的气溶胶和分子作用后, 产生的后向散射回波用直径为 35 cm 的近牛顿式望远镜接收, 其视场角可通过小孔光阑在 $0.2 \sim 2 \text{ mrad}$ 范围内调节。经望远镜接收的回波由数值孔径为 0.22、芯径为 1.5 mm 的传能光纤导出, 然后由准直镜 L 变成平行光束。该平行光束首先经过衰减片 A, 再用一窄带滤光片 F (Materion 公司, 美国) 滤波。该滤光片通光口径为 25.4 mm, 中心波长 (CWL) 为 447.3 nm, 半峰全宽 (FWHM) 为 2 nm, 在 $200 \sim 1100 \text{ nm}$ 波长范围内带外抑制比的光学密度为 5, 且在 NO_2 回波信号两个波长 (446.6 nm 和 448.1 nm) 处的透过率均大于 40%。图 3 是该滤光片透过率曲线和对应波长的 NO_2 吸收截面曲线。滤波后的输出光经 H10426 型光电倍增管 PMT (滨松公司, 日本) 将光信号转变成电信号。

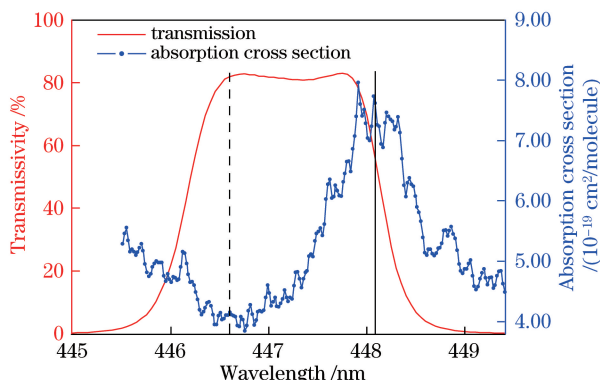


图 3 不同波长下窄带滤光片的透过率曲线和 NO_2 吸收截面曲线

Fig. 3 Transmission curve of narrow-band filter and absorption cross section curve of NO_2 under different wavelengths

3.3 信号采集和时序控制单元

来自光电倍增管 PMT 的电信号由 PCI-9826 型 A/D 数据采集卡 (ADLINK 公司, 4 通道, 16 位, 采样速率为 20 MHz) 记录并存储到计算机中。为减小测量数据所占的存储空间, 保存到硬盘上的数据采用二进制格式。为了能从采集卡存取的数据中准确地区分 λ_{on} 和 λ_{off} 回波信号, 采用现场可编程门阵列 FPGA 电路板为两台 YAG 激光器和采集卡提供外触发信号。FPGA 电路板产生两路 10 Hz 交替的脉冲信号, 脉冲宽度为 $10 \mu\text{s}$, 且上升沿小于 1 ns, 其输出端 A、B 分别接 YAG 1 和 YAG 2 激光器后面板的 lamp trig in (氙灯触发输入) 接口, 作为氙灯的触发信号。输出端 C 与去触发激光器 YAG 1 A 端有一定延时, 且作为采集卡 PCI-9826 CH1 通道的输入, 用于判断 on 与 off 回波, 称为标志位。两台 YAG 激光器的调 Q 输出端分别接 FPGA 的输入端口 Q1 和 Q2, 经或运算、整形和放大等信号处理后产生一个 20 Hz 的 TTL (晶体管-晶体管逻辑电路) 电平信号从端口 D 输出, 提供给采集卡作为采集触发信号。四个输出端的输出波形如图 4 所示。

由图 4 可知,两台 YAG 激光器交替产生激光脉冲并发射到大气中,其回波信号通过望远镜接收、滤波、PMT 转换成电信号后由采集卡的 CH2 通道采集。当输出端 A 触发激光器 YAG 1 产生脉冲时,采集卡 CH2 通道记录 λ_{on} 回波数据,CH1 通道上就会有脉冲数据产生(高电平);当输出端 B 触发激光器 YAG 2 产生脉冲时,采集卡 CH2 通道记录 λ_{off} 回波数据,CH1 通道上无脉冲数据产生(低电平)。将 CH2 通道记录的回波信号与 CH1 通道的高低电平比较,可实现回波信号 on 与 off 的相互鉴别。

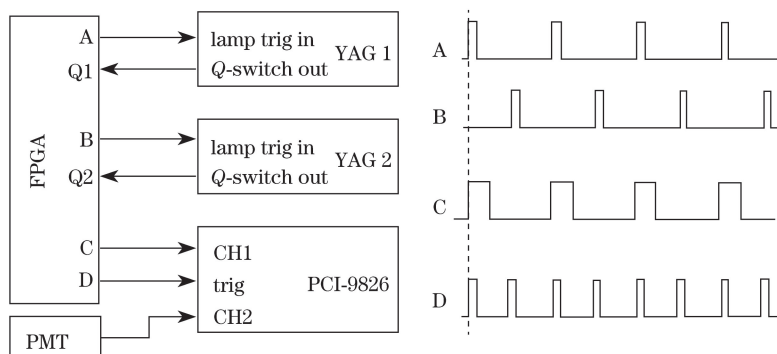


图 4 FPGA 电路板输出波形

Fig. 4 Output waves of FPGA circuit board

4 NO₂ 浓度分布实验及结果

由于该差分吸收激光雷达选用的探测波长处于可见光波段,若白天测量,天空背景过强,不利于提高信号的信噪比,而夜间背景很弱,有利于提高信号的信噪比。因此选择在夜晚进行 NO₂ 浓度的测量。在测量之前,调节两束发射激光都与望远镜光轴平行,调整扩束镜的发散角。由于两台染料激光器的转换效率不一致,需要调整抽运光能量使 λ_{on} 和 λ_{off} 发射光束能量基本一致,有利于提高探测距离。设置信号采集的脉冲数和空间分辨率。最小空间分辨率由采集卡的采集速率决定,PCI-9826 的采集速率为 20 MHz,考虑到系统稳定性,选用 10 MHz 采集速率,对应的最小空间分辨率为 15 m。每个激光脉冲回波采样点数为 2400,回波信号的采集范围为 0~36 km。每台激光器的重复频率为 10 Hz,交替发射。为了便于数据管理和后续反演,1 min 记录 1200 个脉冲(λ_{on} 和 λ_{off} 各 600 个)作为一组数据并保存为一个文件。如测量 3 h,则脉冲个数为 $1200 \times 60 \times 3 = 2.16 \times 10^6$,分为 180 个文件,每个文件以当时的记录时间命名。

NO₂ 在大气中的含量较少,吸收截面较小,后向散射信号较弱。为提高信号信噪比,降低测量统计误差,需要对信号进行长时间累加。每条廓线积累时间为 10 min,共 1.2×10^4 个脉冲,以减小统计噪声。0~5 km 的原始回波信号 $P(z)$ 和距离校正信号 $P(z)z^2$ 分布如图 5 所示。在能见度良好的天气条件下进行水平观测,可认为在激光传输路径上的大气消光系数是常数,因此回波信号的衰减较为均匀。由距离校正信号可知,在 0.4 km 附近有一个峰值,可确定该差分雷达的充满区在 0.4 km 之外。

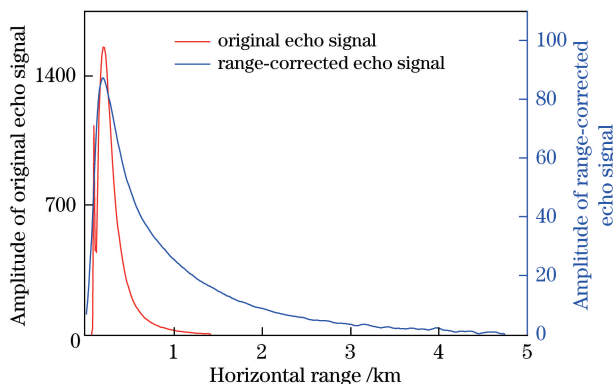


图 5 原始回波信号和距离校正回波信号

Fig. 5 Original and range-corrected echo signals

激光雷达接收到的回波信号包含大气后向散射信号和背景噪声。背景噪声包括天空背景光、光电倍增管暗电流、电子学热噪声以及串入到采集系统的电磁干扰信号等,必须尽可能减少这些噪声。后向散射回波信号是有用信号,用以反演激光雷达探测的物理量。随着探测距离的增加,大气回波信号越来越弱,通常一定距离之后的回波信号不再随距离变化。因此,可选取该距离之后信号的平均值作为背景信号,然后在整个测量区内减去此背景值来扣除背景影响^[16-18],再用分段权重平滑对信号进行降噪,以削弱随机起伏对信号的影响,最后用(7)式反演 NO₂ 的浓度分布。

2016年7月3日20:00~23:00利用该差分吸收激光雷达对淮南大气科学研究院内的NO₂进行了水平浓度观测实验。当晚天气晴朗,微风,能见度良好。图6(a)是当晚20:00~22:42的NO₂水平浓度观测反演结果,每条廓线累计时间为10min;图6(b)是平均水平值和统计误差分布。从图中可以看到,在3km以内,信号信噪比较好,廓线相对集中;3km以外,随着探测距离的增大,受大气衰减和抖动的影响,廓线变化较大,基本在 $0\sim 3\times 10^{-8}$ 之间波动。当晚观测时段的平均水平体积分数为 1.041×10^{-8} ,而中国环境监测总站发布的当天淮南高新区NO₂体积分数为 8.78×10^{-9} ,与反演结果基本符合。NO₂平均水平浓度分布整体相对平坦,这与大气的水平分布相对均匀有关。在1.3km以内探测路径的周围是农田,NO₂浓度较低,1.3km以外浓度逐渐增大,这可能与探测路径经过附近村庄有关,人类活动(如燃料的燃烧、汽车尾气)产生的NO₂随风飘动而使浓度有所增大。

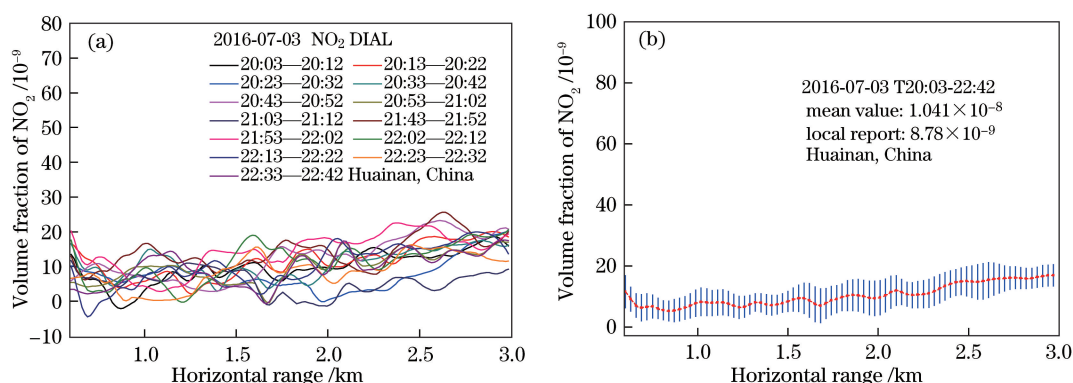


图 6 NO₂ 水平体积分分数探测廓线。(a) 不同时刻的 NO₂ 水平体积分分数分布;(b) NO₂ 平均水平体积分分数
Fig. 6 Horizontal detection profiles of volume fraction of NO₂. (a) Horizontal distribution of volume fraction of NO₂ at different moments; (b) mean value of horizontal NO₂ volume fraction

图7是2016年7月6号晚上探测的NO₂垂直浓度探测廓线。在0.4~3.0km范围内,NO₂体积分分数在 $0\sim 2.5\times 10^{-8}$ 范围内波动,其平均值为 6.71×10^{-9} 。环保部门发布的当天淮南高新区NO₂体积分分数为 6.82×10^{-9} ,与反演结果基本符合。高度2km以下廓线波动较大,2km以上波动相对较小,可能与当晚近地面大气波动较大,上方大气相对平稳有关。

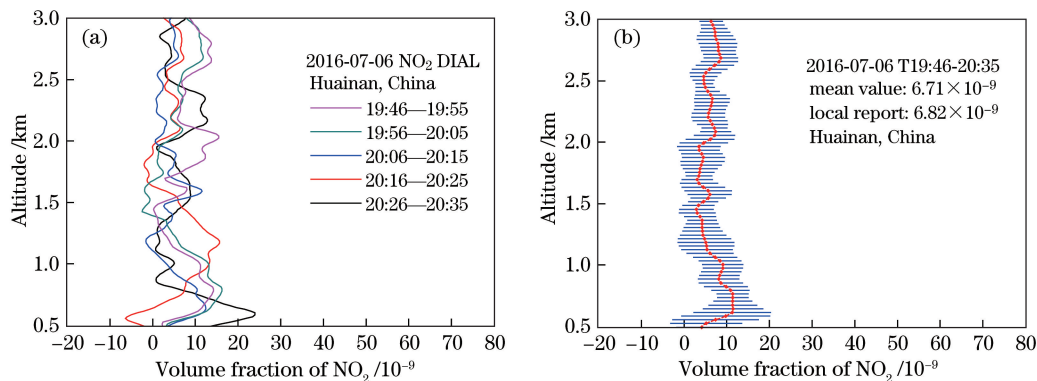


图 7 NO₂ 垂直体积分分数探测廓线。(a) 不同时刻的 NO₂ 垂直体积分分数分布;(b) NO₂ 平均垂直体积分分数
Fig. 7 Vertical detection profiles of volume fraction of NO₂. (a) Vertical distribution of volume fraction of NO₂ at different moments; (b) mean value of vertical NO₂ volume fraction

5 结 论

差分吸收激光雷达技术是探测大气 NO₂ 浓度分布的一种重要方法。采用两台 Nd:YAG 激光器分别抽运两台染料激光器获得 448.1 nm 和 446.6 nm 的波长作为光源并交替发射,通过记录标志位,准确判别 on 与 off 回波并进行反演。利用该差分吸收激光雷达,在淮南大气科学研究院内进行水平和垂直方向大气 NO₂ 浓度测量,在实际测量过程中系统工作稳定,回波信号可靠。与环保部门发布的 NO₂ 浓度观测数据进行同步对比,结果表明该差分吸收激光雷达具有较高的探测灵敏性与准确性。反演结果显示,测量期间淮南大气研究院内大气垂直高度 0.4~3 km 范围内的 NO₂ 体积分数在 $0\sim 2.5\times 10^{-8}$ 内波动,平均垂直体积分数为 6.71×10^{-9} ,平均水平体积分数为 1.041×10^{-8} ,与环保部门的发布值基本符合。对于气溶胶、温度变化、激光雷达过渡区等因素对 NO₂ 浓度反演结果的影响,将进行进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Liu Qi. Environmental chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
刘 琦. 环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min, *et al.* Atmospheric environmental chemistry[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
唐孝炎, 张远航, 邵 敏, 等. 大气环境化学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] Sun Jingqun. Laser monitoring atmosphere[M]. Beijing: Science Press, 1986.
孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [4] Fredriksson K, Galle B, Nystrom K, *et al.* Mobile lidar system for environmental probing[J]. Applied Optics, 1981, 20(24): 4181-4189.
- [5] 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.
- [6] Mori H, Nayuki T, Cao N, *et al.* Development of a laser radar using LDS dye and sum frequency generation for NO₂ measurement[J]. Electrical Engineering in Japan, 2003, 144(2): 26-33.
- [7] Zhang Yinchao, Hu Huanling, Tan Kun, *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.
- [8] Tao Zongming, Zhang Yinchao, Cen Gang, *et al.* Estimating method of detecting minimum pollutant gas concentration by lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 602-604.
陶宗明, 张寅超, 岑 岗, 等. 激光雷达探测污染气体最小浓度的估算方法[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 602-604.
- [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] Li Guohui, Ye Yidong, Xiang Rujian, *et al.* Experiment study of NO₂ concentration measurement with difference absorption lidar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 765-768.
李国会, 叶一东, 向汝建, 等. 差分吸收激光雷达测量 NO₂ 浓度的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 765-768.
- [11] Huang Jian, Hu Shunxing, Cao Kaifa, *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.
- [12] Lin Jinming, Cao Kaifa, Hu Shunxing, *et al.* Experiment study of SO₂ measurement by differential absorption lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 872-878.
林金明, 曹开法, 胡顺星, 等. 差分吸收激光雷达探测二氧化硫实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 872-878.
- [13] Weitkamp C. Lidar: Range resolved optical remote sensing of the atmosphere[M]. New York: Springer-Verlag New York Inc., 2005.
- [14] Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Environment monitoring lidar[M]. Beijing: Science Press, 2001.
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

- [15] Voigt S, Orphal J, Burrows J P. The temperature and pressure dependence of the absorption cross-sections of NO₂ in the 250-800 nm region measured by Fourier-transform spectroscopy[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2002, 149(1-3): 1-7.
- [16] Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1101003.
曹念文, 颜 鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1101003.
- [17] Li Lu, Guo Pan, Zhang Yinchao, *et al.* Application of smoothness prior approach for coherent Doppler wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0728001.
李 路, 郭 磐, 张寅超, 等. 先验平滑方法在相干测风激光雷达中的应用[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0728001.
- [18] Schotland R M. Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1974, 13(1): 71-77.