

文章编号: 1001-3806(2018)04-0433-07

## 差分吸收 NO<sub>2</sub> 激光雷达光源的设计与实现

刘秋武<sup>1,2,3</sup>, 陈亚峰<sup>1,2</sup>, 王杰<sup>1,2</sup>, 王晓宾<sup>1,2</sup>, 曹开法<sup>1</sup>, 黄见<sup>1</sup>, 胡顺星<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026; 3. 韩山师范学院 物理与电子工程学院, 潮州 521041)

**摘要:** 为研制一台探测距离 3km、分辨率 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的大气 NO<sub>2</sub> 廓线差分吸收激光雷达, 以 NO<sub>2</sub> 的吸收光谱和激光雷达方程为基础, 通过数值仿真分析了回波信噪比与水平和垂直方向上大气中气溶胶、NO<sub>2</sub> 含量的分布、探测距离和几何因子的关系; 搭建探测大气 NO<sub>2</sub> 实验系统, 开展了大气 NO<sub>2</sub> 浓度实验观测, 获得水平及垂直高度 0.4km ~ 3.0km 内的 NO<sub>2</sub> 浓度实时分布, 探测分辨率可达 4.717 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 系统稳定可靠。结果表明, 采用两台波长为 354.7nm、能量不小于 100mJ 的 Nd:YAG 激光器分别抽运两台染料激光器的方式, 并以 C450 为染料, 可满足差分吸收探测所需的两束波长为  $\lambda_{\text{on}}$  (448.10nm) 和  $\lambda_{\text{off}}$  (446.80nm)、能量为 8mJ 的输出光束。该方法为实用化 NO<sub>2</sub> 差分吸收激光雷达光源的设计及应用提供了理论依据及技术支持。

**关键词:** 大气光学; 差分吸收激光雷达; 二氧化氮; 波长和能量

**中图分类号:** TN958.98

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.04.001

## Design and implementation of NO<sub>2</sub> differential absorption lidar sources

LIU Qiuwu<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yafeng<sup>1,2</sup>, WANG Jie<sup>1,2</sup>, WANG Xiaobing<sup>1,2</sup>, CAO Kaifa<sup>1</sup>, HUANG Jian<sup>1</sup>, HU Shunxing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. School of Physics and Electronic Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

**Abstract:** To develop an atmospheric NO<sub>2</sub> differential absorption lidar (DIAL) with detection range of 3km and resolution of 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , based on NO<sub>2</sub> absorption spectrum and lidar equation, the relationships among echo signal-to-noise ratio (SNR), aerosol of the horizontal and vertical direction, NO<sub>2</sub> concentration, detection distance and geometric factor were analyzed and simulated. The atmospheric NO<sub>2</sub> experiment system was built, and the atmospheric NO<sub>2</sub> concentration experiment was carried out. The NO<sub>2</sub> concentration in horizontal and vertical height of 0.4km ~ 3.0km was obtained in real time, and the resolution was up to 4.717 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The system was stable and reliable. The results show that, with two Nd:YAG lasers with wavelength of 354.7nm and laser energy not less than 100mJ to pump two dye lasers with C450 as the dye, two output light beams for differential absorption detection can be obtained with  $\lambda_{\text{on}}$  of 448.10nm,  $\lambda_{\text{off}}$  of 446.80nm, and energy of 8mJ. This method provides theoretical basis and technical support for the design and application of practical NO<sub>2</sub> differential absorption lidar light sources.

**Key words:** atmospheric optics; differential absorption lidar; NO<sub>2</sub>; wavelength and energy

## 引言

二氧化氮(NO<sub>2</sub>)是大气中重要的污染气体,对人

体和动植物都有毒性作用。当浓度约 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时会影响人体呼吸困难, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时会对植物造成破坏。NO<sub>2</sub> 也是形成酸雨、酸雾及光化学烟雾的主要污染物。NO<sub>2</sub> 的来源主要来自煤炭石化燃料的燃烧、汽车尾气和化工厂的排放气体。随着我国工业化进程的快速发展, 对煤、石油等能源的需求和汽车数量的日益增加, NO<sub>2</sub> 对环境的影响也越来越严重。对大气污染的监测, 越来越受到人们的重视。

测量大气 NO<sub>2</sub> 浓度的常见方法有盐酸萘乙二胺分光光度法、傅里叶变化光谱技术、差分吸收光谱仪、

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项资助项目(41127901); 国家自然科学基金资助项目(41575032)

作者简介: 刘秋武(1975-), 男, 副教授, 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的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2017-09-07; 收到修改稿日期: 2017-12-13

喇曼散射激光雷达和差分吸收激光雷达<sup>[1-4]</sup>。喇曼散射激光雷达主要缺点是喇曼后向散射截面小、探测灵敏度低、探测距离近,只能用于监测烟囱口等高污染区域<sup>[5]</sup>。而差分吸收激光雷达除有较高灵敏度外,还具有传统地基单点测量难以具备的优点,可以对大范围的大气污染进行遥感监测,获得垂直或水平廓线。自差分吸收技术从 20 世纪 70 年代由 SCHOTLAND 提出以来,已广泛应用于大气中水汽、臭氧、二氧化碳、二氧化硫、甲烷等气体的测量。由于 NO<sub>2</sub> 吸收截面小,大气中含量低,探测难度较大。FREDRIKSSON 和 KÖLSCH 等人用差分吸收激光雷达,测量了如硝酸盐化工厂烟囱及周边烟雾等 NO<sub>2</sub> 浓度较高区域的廓线<sup>[6-7]</sup>。随着激光技术的发展,MORI 等人采用 Nd:YAG 激光器抽运染料激光器,并用晶体和频方法产生两个 448.20nm ~ 446.80nm 波长来测量大气中的 NO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>。在国内,电子科技大学 YIN 等人对差分吸收激光雷达的灵敏度及湍流对浓度反演的影响进行了理论研究<sup>[9]</sup>。中国工程物理研究院 LI 等人用双通道可调谐的 Ti:sapphire 激光器验证了该差分吸收激光雷达系统具有测量 NO<sub>2</sub> 浓度的能力<sup>[10]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所在国内率先利用喇曼频移的方法产生 395.60nm ~ 396.68nm 波长对来测量大气中的 NO<sub>2</sub>,发展了 AML 系列车载式测污激光雷达<sup>[11-13]</sup>。

差分吸收激光雷达是根据目标气体对探测光束的吸收特性来测量的。相对于大气中的 O<sub>3</sub> 和 CO<sub>2</sub>,NO<sub>2</sub> 的含量更低,探测难度较大。为提高测量精度和系统稳定性,并满足多波段多大气成分主被动综合探测系统(atmospheric profiling synthetic observation system, APSOS)项目中大气 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 测量精度的要求,中国科学院安徽光学精密机械研究所采用染料激光器作为光源,研发新一代激光雷达。本文中介绍差分吸收激光雷达的探测原理、波长的选择、光源的设计与实现,最后给出探测 NO<sub>2</sub> 浓度分布的实验结果。

### 1 差分吸收激光雷达原理

差分吸收激光雷达是利用大气分子和气溶胶对发射光束的吸收和散射进行测量的。假设  $P(R)$  为距离  $R$  处的激光雷达回波信号,波长为  $\lambda$  的发射光束功率为  $P_0(\lambda)$ ,在距离  $R$  处大气后向散射系数和消光系数分别为  $\beta(\lambda, R)$  和  $\alpha(\lambda, R)$ ,待测气体分子在波长  $\lambda$  处的吸收截面为  $\sigma(\lambda)$ ,在距离  $R$  处的分子数密度为  $N(R)$ ,系统的接收效率为  $\eta$ ,望远镜的接收面积为  $A$ ,

$\Delta R$  是空间取样距离,则回波信号功率为<sup>[14]</sup>:

$$P(R) = P_0(\lambda)\eta\beta(\lambda, R)\Delta R(A/R^2) \cdot \exp\left[-2\int_0^R [N(z)\sigma(\lambda) + \alpha(\lambda, z)] dz\right] \quad (1)$$

在探测路径上同时或交替发射两束波长非常接近的激光,一束波长位于待测气体分子的吸收峰上,对待测气体有强烈的吸收作用,记为  $\lambda_{on}$ ,另一个波长位于待测气体分子的吸收谷或吸收峰外,记为  $\lambda_{off}$ ,这两束光的回波分别记为  $P_{on}(R)$  和  $P_{off}(R)$ ,由(1)式可得传播路径上不同距离  $R$  处待测气体的分子数密度为:

$$N(R) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \left[ \ln \frac{P(\lambda_{on}, R)}{P(\lambda_{off}, R)} \right] + B - E_a - E_m \quad (2)$$

式中,

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}) \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \left[ \ln \frac{\beta(\lambda_{on}, R)}{\beta(\lambda_{off}, R)} \right] \quad (4)$$

$$E_a = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_a(\lambda_{on}, R) - \alpha_a(\lambda_{off}, R)] \quad (5)$$

$$E_m = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_m(\lambda_{on}, R) - \alpha_m(\lambda_{off}, R)] \quad (6)$$

式中,  $\Delta\sigma$  为待测气体分子在波长  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  处的吸收截面差,  $B, E_a$  及  $E_m$  分别为大气后向散射作用项、大气气溶胶消光作用项及大气分子消光作用项,统称为修正项;  $\alpha_a(\lambda_{on}, z)$  和  $\alpha_a(\lambda_{off}, z)$  为距离  $R$  处  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  波长大气气溶胶的消光系数;  $\alpha_m(\lambda_{on}, z)$  和  $\alpha_m(\lambda_{off}, z)$  为距离  $R$  处  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  波长大气分子的消光系数。

若  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  相差很小,则修正项  $B, E_a$  及  $E_m$  可以忽略不计。对(2)式进行差分运算,可得  $R$  到  $R + \Delta R$  之间的平均值:

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

式中,  $\Delta R$  为差分距离。由(2)式 ~ (7)式可知,只有当  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  越接近时,修正项  $B, E_a$  及  $E_m$  的影响才越小。因此,  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  要尽可能选取波长间隔小且吸收截面差  $\Delta\sigma$  大的波长对,并尽量避开待测气体以外其它气体的吸收干扰。图 1 是 NO<sub>2</sub> 在 230nm ~ 630nm 之间的光谱吸收截面<sup>[15]</sup>。在 450nm 附近有几个吸收峰可用于差分吸收激光雷达测量,本文中选取  $\lambda_{on}$  (448.10nm) 和  $\lambda_{off}$  (446.80nm) 作为探测波长,而不选择  $\lambda_{on}$  左侧更高的吸收峰(447.92nm),这是因为它的左侧 0.05nm 范围内谱线变化剧烈,如果激光器的波长略为漂移,吸收截面就会造成较大的误差。

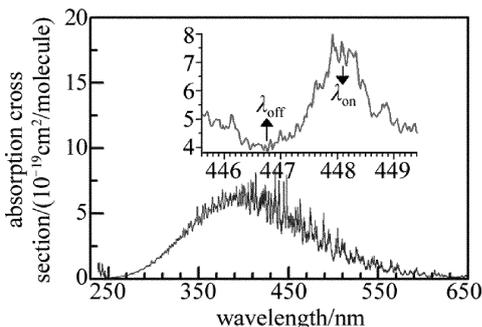


Fig. 1 Absorption cross section of NO<sub>2</sub> and the position of  $\lambda_{on}$  and  $\lambda_{off}$

## 2 系统光源的设计与实现

按照 APSOS 项目中探测大气 NO<sub>2</sub> 的测量指标,要求探测精度为 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,探测范围 3.0km。参照 AML 系列车载式测污激光雷达的设计及探测结果<sup>[11-13]</sup>,接收望远镜为直径 350mm 牛顿式望远镜,干涉滤光片滤波(中心波长 447.50nm,带宽 3.0nm,带外扼制比为 OD5 @ 200 ~ 1100nm,峰值透过率为 70%),光电倍增管选用日本滨松公司的 H10426,数据采集卡为 ADLINK 公司的 PCI-9826 型(四通道,16bit,采样速率 20MHz)。由(7)式可得差分吸收激光雷达的探测极限为:

$$N_{\min} = \frac{1}{2\Delta R\Delta\sigma} \left[ \ln \frac{P(\lambda_{on}, R)}{P(\lambda_{off}, R)} - \ln \frac{P(\lambda_{on}, R + \Delta R)}{P(\lambda_{off}, R + \Delta R)} \right]_{\min} = \frac{\Delta}{2\Delta R\Delta\sigma} \quad (8)$$

由(8)式可知,当探测波长确定后,探测极限可通过空间分辨率和回波的功率比来调整,按所选元器件的性能,回波比的对数差值  $\Delta \approx 1.2 \times 10^{-4}$ ,探测极限为 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。为确定激光器的能量,将从气溶胶消光系数、大气 NO<sub>2</sub> 含量、激光雷达的几何因子和探测距离等因素来确定。回波的信噪比定义为<sup>[16]</sup>:

$$R_{\text{SNR}} = \frac{N_s \sqrt{M}}{\sqrt{N_s + 2(N_b + N_d)}} \quad (9)$$

式中,  $N_s$  为回波光子数,  $N_b$  为背景辐射光子数,  $N_d$  为光电倍增管的暗计数,  $M$  是激光累计脉冲数。设大气消光系数  $\alpha$  对  $\lambda_{on}$  为 0.6km<sup>-1</sup>, 而  $\lambda_{off}$  的消光系数按指数关系求出。NO<sub>2</sub> 水平均匀分布,浓度为 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,激光器的发射能量为 5mJ,重复频率为 10Hz。由(1)式和(9)式可计算出回波的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),其中,激光累计脉冲数  $M = 6000$ (对应测量时间 10min),图 2 是其回波的信噪比。由图可知,当波长  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  两个回波随着距离的增大而衰减,  $\lambda_{on}$  衰减较快,信噪比大于 10 的范围约为 0km ~ 4.7km,信号的

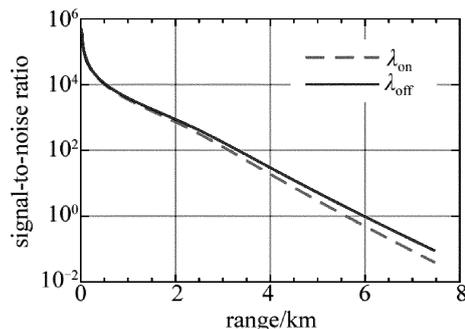


Fig. 2 Echo SNR of  $\lambda_{on}$  and  $\lambda_{off}$

动态范围为 6 个数量级。发射系统采用与接收望远镜同轴的结构,盲区短,也可对近端信号进行压缩。图 3 是几何因子及  $\lambda_{on}$  回波信号。经过系统几何因子对回波的压缩,把近距离的 300m 内强回波信号压下来,而后的信号几乎不受影响,动态范围为 4 个数量级,方便光电倍增管的接收。

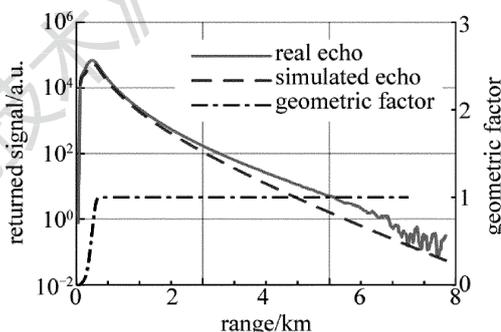


Fig. 3 Geometric factor and the compressed echo of  $\lambda_{on}$  wavelength

图 4 是信噪比大于 10 时,最远探测距离随激光输入能量变化的情况。在消光系数  $\alpha = 0.6\text{km}^{-1}$  条件下,当输入能量从 2mJ 增大到 4mJ 时,最远探测距离增加 300m;从 4mJ 增大到 6mJ 时,最远探测距离增加 200m。由曲线可知,在满足探测距离的条件下,通过增大能量的方法来增大探测距离并不明显。比较两条曲线可知,在相同的激光能量下,消光系数对探测距离影响较大。

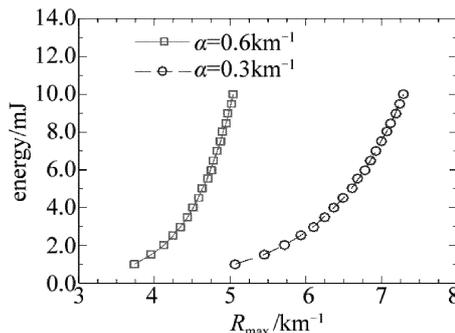


Fig. 4 Relationship between laser energy and the farthest detection distance

图 5 是在信噪比大于 10、测量距离大于 3.0km 条件下,不同消光系数下所需的能量。可以看出,消光系

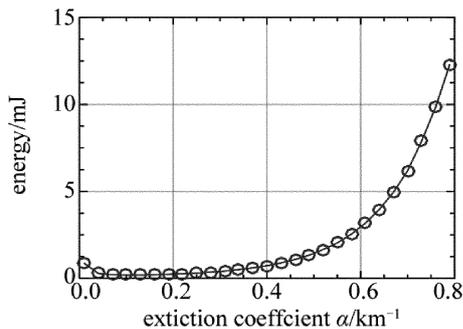


Fig. 5 Relationship between the required energy and extinction coefficients ( $R_{SNR} > 10, R_{max} > 3.0\text{km}$ )

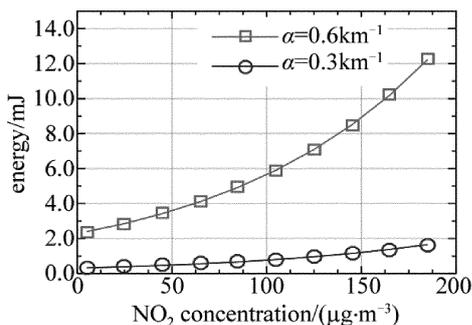


Fig. 6 Relationship between the required energy and  $\text{NO}_2$  concentration ( $R_{SNR} > 10, R_{max} > 3.0\text{km}$ )

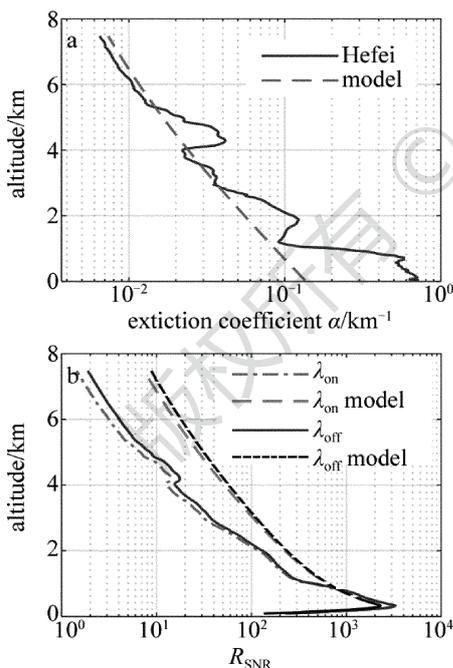


Fig. 7 The profiles of extinction coefficient and echo SNR

数越大时,所需的能量越高。消光系数  $\alpha > 0.6\text{km}^{-1}$  时所需的能量增长率远大于  $\alpha < 0.6\text{km}^{-1}$  时。图 6 是在信噪比大于 10、测量距离大于 3.0km 条件下,大气中不同的  $\text{NO}_2$  含量所需的激光发射能量。可以看出,当大气中  $\text{NO}_2$  含量越高时,所需的激光发射能量大,但

与气溶胶增量(消光系数)相比,所需发射能量的增量较为缓慢。为满足测量  $\text{NO}_2$  浓度的垂直廓线,以合肥科学岛上空气溶胶的典型分布为参考<sup>[17]</sup>,假设  $\text{NO}_2$  的垂直分布为指数分布,大气分子的分布为中纬度模式。假定激光发射能量为 5mJ,图 7 是消光系数廓线及对应的回波信噪比。由于受气溶胶不均匀性的影响,回波有明显的起伏,信噪比大于 10 的高度为 4.5km。如果消光系数采用中纬度模式分布,信噪比大于 10 的高度为 6.5km。综合气溶胶在水平和垂直方向上的分布、 $\text{NO}_2$  含量、信噪比、几何因子和探测距离等因素的影响,确定激光器的输出能量为 5mJ 能满足要求。

由于探测  $\text{NO}_2$  所用两个波长为  $\lambda_{on}$  (448.10nm),  $\lambda_{off}$  (446.80nm),选用染料激光器作为光源比较方便。采用两台 Nd:YAG 激光器(美国 Continuum 公司的 PL8010)的 354.7nm 波长分别抽运两台染料激光器(德国 Radiant Dyes 公司的 NarrowScanK)的方式来实现。选用乙醇作溶剂,染料为香豆素(C450),可产生这两个波长,转换效率约为 15%。系统结构如图 8 所示,主要参量如表 1 所示。从两台染料激光器输出的这两束光,先用合束棱镜合为一束,再用望远镜扩束及调整发散角,最后通过 3 维扫描头射向大气。依据各个元件的传输效率,并预留 20% 的能量裕量,确定染料激光器的输出能量为 10mJ,抽运用的 Nd:YAG 激光器 354.7nm 波长的能量不小于 90mJ,而 354.7nm 波长是由 1064nm 波长的三倍频获得,这里不再赘述。

Table 1 Specifications of DIAL system

transmitter		
laser class	Nd:YAG laser	dye-laser
laser type	Continuum PL8010	radiant narrowscan dyes-laser
wavelength/nm	354.7	448.1/446.8
energy/mJ	100	10
repetition/Hz	10	10
divergence/ mrad	$\leq 0.45$	$\leq 2.0$
receiver		
telescope	type:near newtonian;focus length:750mm; diameter:350mm;field of vision:(0.2~2.0)mrad	
optical fibre	numerical aperture:0.22;diameter:1.5mm	
detector	H10426;aperture:25mm;185nm~650nm; rise time < 50ns;gains: $10^5 \sim 10^6$	
optical filter	central wavelength:447.50nm;bandwidth:3.0nm; block optical density 5:(200~1100)nm;aperture:25.4mm	
signal acquisition		
A/D	PCI-9826H;20M samples/s;channel number 4(16bit)	

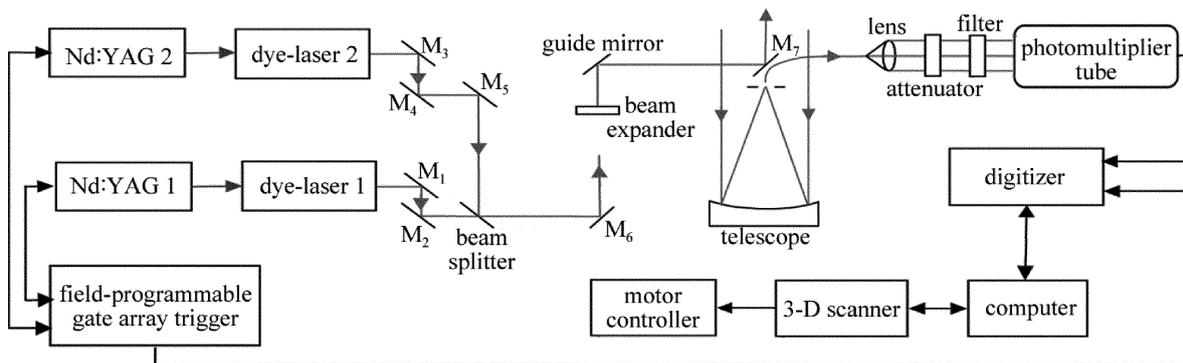


Fig. 8 Structure diagram of NO<sub>2</sub> differential absorption laser radar system

### 3 实验及结果分析

为了使输出光束的能量和波长稳定,需要先对 Nd:YAG 激光器预热,打开染料泵让染料液体循环稳流,30min 后开始出光。用能量计监测能量,先后调整 Nd:YAG 激光器二倍频光 532nm 和三倍频光 354.7nm 晶体的角度,使输出光强度最大。调整、优化染料激光器光路,并用波面分析仪或光斑相纸观测光束波面的能量分布,反复调节,在光斑均匀的前提下使输出能量最大。调整  $\lambda_{on}$  比  $\lambda_{off}$  两束光路使其合成一束,然后由扩束镜扩束至 24 倍后,由反射镜导入接收望远镜的次镜 M<sub>7</sub>,再经 3 维扫描头射向大气。后向散射回波经望远镜接收、后继光路准直、滤波后由光电倍增管转换、采集单元记录回波信号,并由计算机处理后在屏幕上显示,图 3 中的实线是系统的  $\lambda_{on}$  回波,除 5.0km 后因噪声影响而波动较大外,回波形状与仿真曲线较为接近。调整导向镜使回波信号的探测距离尽可能远,并通过调整 Nd:YAG 激光器的抽运能量,使两个回波的幅度基本一致。

NO<sub>2</sub> 差分吸收激光雷达的探测波长处于可见光波段,为了减小太阳背景辐射的影响,实验选择在夜间进行。同时,为了提高信噪比,每组信号  $\lambda_{on}$  比  $\lambda_{off}$  两个波长各 6000 个脉冲(对应的采集时间为 10min)平均而成。对采集到的数据进行扣除背景、平滑滤波、修正两个通道几何因子并用(2)式反演大气 NO<sub>2</sub> 的浓度廓线,其中的气溶胶系数采用 Klett 积分法反演并修正<sup>[18]</sup>。

测量误差可分为系统误差和随机误差两大类。系统误差包括:(1)仪器误差,主要是 on 与 off 波长两束光的合束并与接收望远镜共轴引起的误差,通常小于 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;(2)气溶胶的后向散射和消光引起的误差,在能见度较好的晚间观测,气溶胶影响较小,而在重污染天气下,气溶胶影响较大,可通过对气溶胶的修正来减

小其影响。随机误差包括:(1)与温度和压强有关的 NO<sub>2</sub> 吸收截面的不确定性,通常小于 3%;(2)统计误差,主要包含大气抖动、光电倍增管和采集卡的电子噪声、激光能量波动和波长漂移引起的误差。在 450nm 附近其它气体的吸收截面远小于 NO<sub>2</sub>,可忽略其它气体对 NO<sub>2</sub> 的干扰<sup>[19-20]</sup>。修正后的总测量误差小于 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

采用本单位研制的 NO<sub>2</sub> 差分吸收激光雷达,2017-06-13 日夜间在淮南大气科学研究院进行了水平浓度观测。图 9a 是当晚 18:52 ~ 22:52 的观测反演结果,每条廓线累计 10min,从图中可以看到,在 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  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,由于大气的衰减和抖动影响,廓线变化较大,NO<sub>2</sub> 浓度基本在 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ~ 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  范围波动。在 0.5km ~ 1.2km 内浓度相对较高,是因为传播路径上 0.8km 处有工厂当时排放废气中含有较高浓度的 NO<sub>2</sub> 气体为 26.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在 1.2km ~ 3.0km 内的平均水平浓度为 18.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,与当晚观测时段环境监测部门发布的 NO<sub>2</sub> 浓度为 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  基本符合。图 9b 是探测路径上 NO<sub>2</sub> 浓度的时间演变图,可以看出,在 18:52 ~ 21:52 时段内 0.8km 附近有几个明显的高浓度时间,表示对应的时空内存在排放源头,其它地方的 NO<sub>2</sub> 的水平分布相对分散,符合对应这片区域是农田的特点。图 9c 是时间分辨率为 30min 的廓线图,廓线相对集中。图 9d 是把时间分辨率分别设置为 30min, 20min 和 10min 的水平浓度平均值廓线及对统计误差图。统计误差既包含仪器的测量误差,也包含测量时段 NO<sub>2</sub> 浓度的变化。由(9)式可知,增加累加脉冲数  $M$  可使信噪比提高  $\sqrt{M}$  倍,其统计误差在信噪比较好的 1.5km ~ 2.5km 处之比为 1.838:1.473:1,统计误差分别为 8.669 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 5.879 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 4.717 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,符合设计指标要求。

图 10 是 2017-06-14T20:50 ~ 24:00 进行的垂直

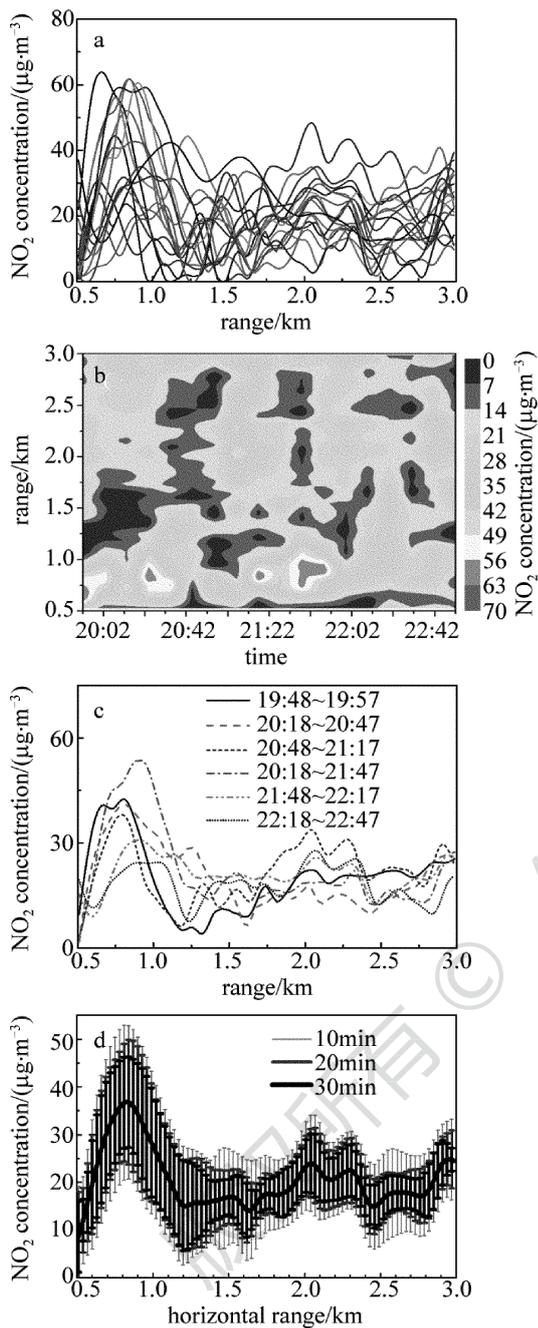


Fig. 9 Horizontal profile of NO<sub>2</sub> concentration

a—horizontal profiles with 10min temporal resolution b—horizontal distribution from 19:52 to 22:42 c—horizontal profiles with 30min temporal resolution d—mean value and statistic error of horizontal distribution

探测廓线。在 0.5km ~ 3.0km 范围内, NO<sub>2</sub> 浓度在 (0 ~ 64) μg/m<sup>3</sup> 范围内波动, 随着高度的增加, 浓度总体上呈减小趋势。近地面 0.5km ~ 1.5km 的平均值为 39.2 μg/m<sup>3</sup>, 与环保部门发布的 42 μg/m<sup>3</sup> 基本符合。高度 1.5km 以下廓线波动较大, 1.5km 以上波动相对较小, 可能与当晚近地面大气波动较大, 上方相对平稳有关。

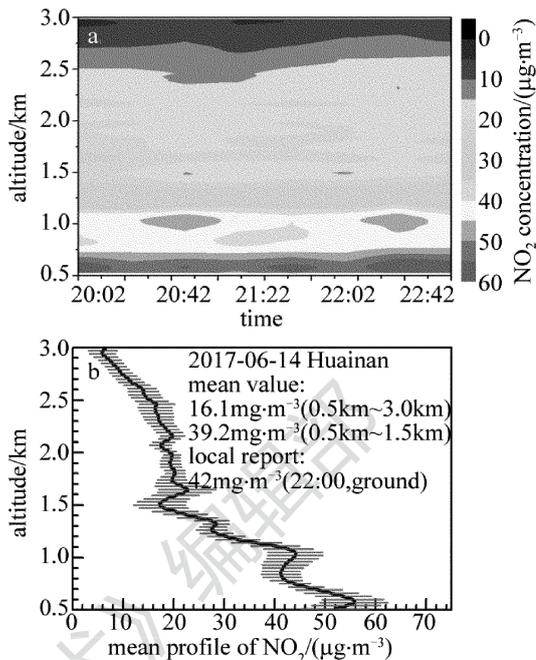


Fig. 10 Vertical profile of NO<sub>2</sub> concentration

a—vertical distribution from 20:50 to 24:00 b—mean value and statistic error of vertical distribution

#### 4 结论

差分吸收光谱技术是探测大气 NO<sub>2</sub> 的有效方法。准确选择并产生探测所需的 λ<sub>on</sub> 和 λ<sub>off</sub> 两个波长是整个系统的关键。通过对 NO<sub>2</sub> 吸收谱的比对, 结合本系统所用激光器的波长稳定性, 选择强吸收波长 λ<sub>on</sub> (448.10nm) 而不选择 λ<sub>on</sub> 左侧更高的吸收峰 (447.92nm), 虽然灵敏度略为降低, 但可减少因波长漂移而使吸收截面急剧下降引入的误差。弱吸收 λ<sub>off</sub> (446.60nm) 选择在 λ<sub>on</sub> 附近的波谷位置, 减小气溶胶的影响。为满足探测距离反演精度, 激光器的输出能量必须使回波满足一定的信噪比。通过对水平和垂直方向上的大气中气溶胶、NO<sub>2</sub> 含量的分布、回波信噪比、探测距离和几何因子等因素的综合考虑, 确定采用波长为 354.7nm、能量不小于 100mJ 的 Nd:YAG 激光器抽运染料激光器, 选用 C450 为染料, 可获得能量为 8mJ 的输出光束。通过长期对进行大气 NO<sub>2</sub> 浓度观测, 测量结果合理, 系统工作稳定可靠。

#### 参考文献

[1] KANAYA Y, IRIE H, TAKASHIMA H, *et al.* Long-term MAX-DOAS network observations of NO<sub>2</sub> in Russia and Asia (MADRAS) during the period 2007-2012: instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(15):7909-7927.

- [2] LIN W H, GAO Zh H, YANG Y, *et al.* NO<sub>2</sub> detection based on laser spectrum differential method[J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (6): 835-838(in Chinese).
- [3] TANG X Y, ZHANG Y H, SHAO M, *et al.* Atmospheric environmental chemistry[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006:263-271(in Chinese).
- [4] WU F Ch, LI A, XIE P H, *et al.* Detection and distribution of tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column density based on mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(11):114211(in Chinese).
- [5] SCHOTLAND R M. Some observations of the vertical profile of water vapor by a laser optical radar[C]//Proceedings of the 4th Symposium on Remote Sensing of Environment. Michigan, USA: University of Michigan, 1966:273-283.
- [6] FREDRIKSSON K, GALLE B, NYSTROM K, *et al.* Mobile lidar system for environmental probing [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(24):4181-4189.
- [7] KÖLSCH H J, RAIROUX P, WOLFJ P, *et al.* Simultaneous NO and NO<sub>2</sub> DIAL measurement using BBO crystals [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(11):2052-2056.
- [8] MORI H, NAYUKI T, CAO M W, *et al.* Development of a laser radar using LDS Dye and sum frequency generation for NO<sub>2</sub> measurement[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2003, 144(2):26-32.
- [9] YIN Sh R, WANG W R, LI X Sh. Research on return signal statistical model of differential absorption lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(1): 1-5(in Chinese).
- [10] LI G H, YE Y D, XIANG R J, *et al.* Experiment study of NO<sub>2</sub> concentration measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5):181-184(in Chinese).
- [11] ZHANG Y Ch, HU H L, TAN K, *et al.* Development of a mobile lidar system for airpollution monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8):1025-1031(in Chinese).
- [12] TAO Z M, ZHANG Y Ch, CEN G, *et al.* Estimating method of detecting minimum pollutant gas concentration by lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5):602-604(in Chinese).
- [13] HU Sh X, HU H L, ZHANG Y Ch, *et al.* A new differential absorption lidar for NO<sub>2</sub> measurements using Raman-shifted technique [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(8):435-437.
- [14] YAN J X, GONG Sh Sh, LIU Zh Sh. Environment monitoring lidar [M]. Beijing: Science Press, 2001:76(in Chinese).
- [15] VOIGT S, ORPHAL J, BURROWS J P. The temperature and pressure dependence of the absorption cross-sections of NO<sub>2</sub> in the 250-800nm region measured by fourier-transform spectroscopy[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology Chemistry*, 2002, 149(1/3):1-7.
- [16] SPINHIRENE J D. Micro pulse lidar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1993, 31(1):48-55.
- [17] WANG Y J, HU Sh X, ZHOU J, *et al.* Lidar atmospheric parameter measurements-high resolution vertical survey of important atmospheric parameters in eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 182(in Chinese).
- [18] BROWELLE V, ISMAIL S, SHIPLEYS T. Ultraviolet DIAL measurements of O<sub>3</sub> profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(17): 2827-2836.
- [19] SCHOTLAND R M. Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1974, 13(1):71-77.
- [20] CAO N, FUJII T, FUKUCHI T. Estimation of differential absorption lidar measurement error for NO<sub>2</sub> profiling in the lower troposphere [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(1): 218-224.