

文章编号: 0258-7025(2004)09-1121-06

## 差分吸收激光雷达测量环境 SO<sub>2</sub>

胡顺星, 胡欢陵, 张寅超, 刘小勤, 谭 琨

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 提出了一种新的差分吸收激光雷达(DIAL)技术探测大气环境 SO<sub>2</sub>。利用 Nd:YAG 激光器的四倍频 266.0 nm 抽运甲烷和氘气, 可以获得它们的一级斯托克斯拉曼频移波长 288.38 nm 和 289.04 nm。SO<sub>2</sub> 对波长为 289.04 nm 的激光吸收较强, 对 288.38 nm 的激光吸收较弱, 波长对 288.38 nm 和 289.04 nm 可用于大气 SO<sub>2</sub> 的测量。利用这种技术, 建立了一台测量大气 SO<sub>2</sub> 的差分吸收激光雷达, 并进行了实际测量和初步研究, 对激光雷达测量 SO<sub>2</sub> 误差的主要来源进行了分析, 并估计了测量误差的大小。差分吸收激光雷达的测量结果与仪器测量结果相比具有可比性。

**关键词** 大气与海洋光学; 差分吸收激光雷达; 拉曼频移; SO<sub>2</sub>; 甲烷; 氘气

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## Differential Absorption Lidar for Environmental SO<sub>2</sub> Measurements

HU Shun-xing, HU Huan-ling,

ZHANG Yin-chao, LIU Xiao-qin, TAN Kun

(*Lab of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*)

**Abstract** In this paper a new technique of differential absorption lidar (DIAL) was presented for environmental SO<sub>2</sub> measurements. The fourth harmonic of Nd:YAG laser was used to pump CH<sub>4</sub> and D<sub>2</sub> gas cell, and their first Stokes Raman-shifted wavelengths of 288.38 nm and 289.04 nm were gotten. Laser beam of 289.04 nm is rather strongly absorbed by SO<sub>2</sub>, but another laser beam of 288.38 nm is weakly absorbed. This wavelength pair of 288.38 nm and 289.04 nm can be used to measure environmental SO<sub>2</sub> concentrations. Based on this technique, a SO<sub>2</sub> DIAL was constructed. SO<sub>2</sub> actual measurements and primary studies were also carried out at lidar located site. Measurement errors were analyzed and evaluated. SO<sub>2</sub> concentrations measured by SO<sub>2</sub> DIAL are comparable with results obtained by SO<sub>2</sub> analyzer.

**Key words** atmospheric and ocean optics; differential absorption lidar; Raman-shifted; SO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; D<sub>2</sub>

### 1 引 言

SO<sub>2</sub> 是地球大气环境中的痕量气体成分, 与人类生活休戚相关。尤其在近地面, SO<sub>2</sub> 已成了影响人们日常生活和身体健康的非常有害气体。SO<sub>2</sub> 除了自然来源外, 还有人为来源, 如工业的生产活动。随着社会的工业化发展, 生产活动排出的污染气体愈来愈多, 对环境的影响愈来愈大。

监测污染气体 SO<sub>2</sub> 的手段较多, 其中差分吸收激光雷达(DIAL)是一种比较好的手段, 它具有许多优点, 如快速实时、空间分辨率高、测量范围大等等。因此, 差分吸收激光雷达测量污染气体技术得到比较多的研究<sup>[1~7]</sup>。本文利用 Nd:YAG 四倍频激光抽运 CH<sub>4</sub> 和 D<sub>2</sub> 等气体, 获得它们的一级 Stokes 拉曼频移波长 288.38 nm 和 289.04 nm, 利用这对激光波长来测量大气中的 SO<sub>2</sub> 浓度。

收稿日期: 2003-05-06; 收到修改稿日期: 2003-08-14

基金项目: 国家科委 863 高科技项目(激光技术领域)资助课题。

作者简介: 胡顺星(1966—), 男, 浙江东阳人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所副研究员, 主要从事激光雷达研制和激光雷达探测大气参数研究工作。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn

## 2 SO<sub>2</sub> 的差分吸收激光雷达测量方法

差分吸收激光雷达技术的基本原理是利用待测气体分子的吸收特性测量该气体的浓度。差分吸收激光雷达向大气中的同一光路发射波长接近的两束脉冲激光,其中一种激光波长处于待测气体的吸收线上,记为 $\lambda_{on}$ ,它被待测气体较强烈吸收;另一激光波长处于待测气体的吸收线的边翼上或吸收线外,记为 $\lambda_{off}$ ,待测气体对它吸收很小或没有吸收。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种波长的消光一般情况下基本相同,两束激光的回波强度的差异只是由待测气体分子的吸收所引起,从而根据两种波长回波强度的差别可以确定待测气体分子的浓度。根据两种波长回波强度 $P(\lambda_{on}, z)$ 和 $P(\lambda_{off}, z)$ 可以确定高度 $z$ 和 $z + \Delta z$ 区间的待测气体浓度 $N(z)$ ,可表达为<sup>[8]</sup>

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

式中, $\delta(T)$ 为温度 $T$ 时的待测气体吸收截面。不同的作者给出的吸收截面是有些差别的。我们选择293 K下的吸收截面。图1为Spurr等给出的SO<sub>2</sub>吸收截面<sup>[9]</sup>。 $B_A, E_A, E_M$ 分别为大气后向散射、大气气溶胶、大气分子消光引起的修正项。在实际测量中往往将 $E_A$ 和 $B_A$ 忽略。

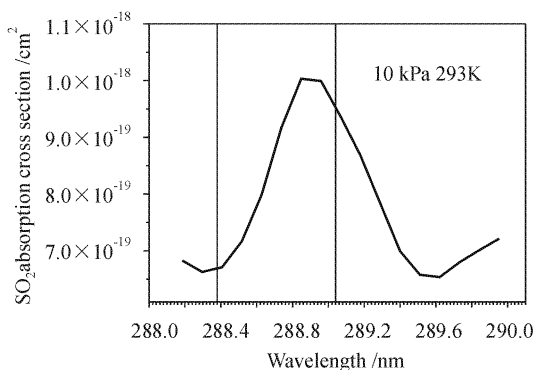


图1 SO<sub>2</sub> 的吸收截面

Fig. 1 Absorption cross section of SO<sub>2</sub> at 293 K

我们提出将拉曼频移波长288.38 nm ( $\lambda_{off}$ )和289.04 nm ( $\lambda_{on}$ )用于SO<sub>2</sub>测量,波长289.04 nm产生于Nd:YAG四倍频抽运氩气的一级斯托克斯拉曼频移;波长288.38 nm产生于Nd:YAG四倍频抽运甲烷气体的一级斯托克斯拉曼频移。

## 3 差分吸收激光雷达系统

测量近地面大气SO<sub>2</sub>的差分吸收激光雷达主要由激光发射、回波信号的光学接收、信号采集以及测量过程控制等部分组成。图2给出了该差分吸收激光雷达的结构框图。

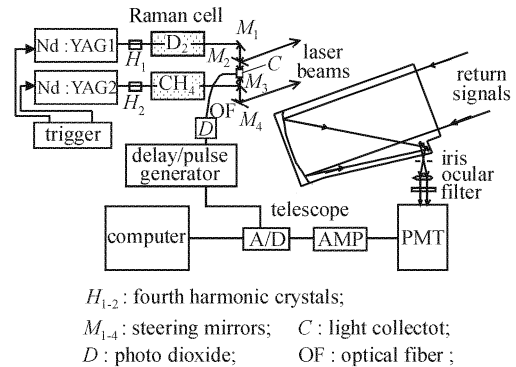


图2 差分吸收激光雷达结构框图

Fig. 2 Schematic diagram of SO<sub>2</sub> differential absorption lidar

### 3.1 激光发射

发射部分由两台Nd:YAG激光器、激光触发器、二倍频、四倍频晶体、氩气拉曼池、甲烷拉曼池和若干导向镜组成。从拉曼池中出来的光除了用于测量SO<sub>2</sub>外,还有1064, 532和266 nm抽运激光以及高级斯托克斯和反斯托克斯散射激光。导向镜的反射面镀有介质膜,用于测量SO<sub>2</sub>的激光经导向镜导入大气中。不需要的激光波长透过导向镜,被排除掉或用于时间延迟和脉冲发生器的触发信号。

### 3.2 光学接收

光学接收部分用来接收激光的后向弹性散射信号,由接收望远镜、小孔光阑、目镜和滤光片等组成。望远镜的主镜面是离轴抛物面,用来收集激光的后向散射信号。小孔光阑的孔径可以调节,用以限制接收望远镜的视场角。目镜将聚焦光变成平行光。窄带干涉滤光片可以通过用于测量的激光波长,其他波长的背景光被截止。接收望远镜主轴的仰角约为30°。

### 3.3 信号采集和测量过程控制

信号采集和控制部分由光电倍增管(PMT, EMI9813QB),高压电源(PS325/2500V-25 W),放大器(AMP. vv100BTB),A/D采集卡(PCL9812),时间延迟和脉冲发生器(DG535),光收集器(自制),制冷器(FACT50)以及工业控制计算机等组成。制冷器使光电倍增管工作于零下20℃,使光电倍增管

产生较少的热噪声。时间延迟和脉冲发生器用来控制 A/D 采集卡的采集起始和终止时间,使 A/D 的采集与激光出射同步。

### 3.4 采集和测量

由脉冲触发器以 20 Hz 频率方波脉冲交替触发两台 YAG 激光器。两台激光器产生的基频 1064 nm 激光,各自经过二、四倍频晶体,得到 266 nm 激光,Nd:YAG 1 激光器产生的 266 nm 激光去抽运氩气拉曼池中的氩气,获得拉曼频移波长 289.04 nm 激光;Nd:YAG 2 激光器产生的 266 nm 激光去抽运甲烷拉曼池中的甲烷,获得拉曼频移波长 288.38 nm 激光。两束拉曼激光经导向镜  $M_1 \sim M_4$ ,使平行于望远镜光轴,导入大气中。 $M_2$  和  $M_3$  镜对 289.04 nm 和 288.38 nm 波长激光全反,对其他波长高透,透过的激光射向光收集器,经光纤导入光电二极管,光电二极管将光信号转化为电脉冲,送到时间延时和脉冲发生器,时间延时和脉冲发生器产生一定时间宽度的方波去触发 A/D 板,并控制 A/D 卡的采集时间。望远镜收集的激光大气后向散射光,聚焦于小孔光阑。经小孔光阑的发散光通过目镜后,变成平行光,然后经中心波长为 289 nm,带宽为 10 nm 的窄带滤光片,导入到光电倍增管的阴极靶面。激光的后向散射光信号经光电倍增管变成电信号,再经放大器放大,送到数据采集卡。A/D 卡采集到的回波强度数据存储到计算机硬盘,以备进一步处理和分析。

## 4 测量结果和讨论

差分吸收激光雷达系统经过调试后,进行了多天的测量。如果大气中 O<sub>3</sub> 的浓度比较高,会对 SO<sub>2</sub> 的测量产生较大影响。在合肥地区,地面大气 O<sub>3</sub> 浓度具有昼夜变化特点,一般夜间浓度比白天低。而且,8 月份对流层 O<sub>3</sub> 平均浓度是一年中最低的月份。我们选择了 8 月份的夜间测量。

差分吸收激光雷达采集得到空间分辨率 15 m 的两个激光波长的回波信号后,我们对原始数据作如下处理。先对回波信号进行预处理,重新组合合成分辨率为 150 m 的分布,对信号中的背景扣除,以 12~15 km 的背景平均值作背景,作三点权重平滑;然后,根据公式(1)进行 SO<sub>2</sub> 浓度的计算,其中将  $E_A$  和  $B_A$  项忽略;最后,再对计算结果作三点权重平滑,即得到 SO<sub>2</sub> 的浓度分布。图 3 给出了 3 天的测量结果。该激光雷达所在地的 SO<sub>2</sub> 浓度一般在  $5.38 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup> 以下。8 月 12 日晚 SO<sub>2</sub> 浓度很低,为  $2.34 \times 10^{10}$  molecules/cm<sup>3</sup>,天气条件较差,下着小雨,大气中的 SO<sub>2</sub> 被雨水冲刷掉了。测量地位于合肥西郊,除少量住家外,无污染,空气质量较好。为检验差分吸收激光雷达的测量结果,表 1 给出了测量期间的天气状况,差分吸收激光雷达测量范围内 SO<sub>2</sub> 平均浓度和测量最低点的 SO<sub>2</sub> 浓度以及环保局测量仪器的地面测量 SO<sub>2</sub> 浓度。从表中可以看到,激光雷达测量的 SO<sub>2</sub> 平均浓度均小于  $5.38 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>。从 8 月 9 日晚的浓度分布可以看到,垂直高度 0.6 km 处 SO<sub>2</sub> 浓度较大。这是因为在测量地的东面 8 km 处为合肥电厂,电厂排放的烟雾输送而造成的。环保局测量仪器的地面测量 SO<sub>2</sub> 浓度的平均值(1 h 平均)小于  $1.34 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>。差分吸收激光雷达给出的最低点(斜程 0.75 km)SO<sub>2</sub> 浓度与环保局仪器测量结果相比,偏差一般在  $1.34 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup> 内,差分吸收激光雷达测量的数据略大。尽管环保局测量仪器经过较严格的定标,仍然存在较小的误差,如 8 月 8 日环保局测量仪器给出的结果为  $-6.93 \times 10^{10}$  molecules/cm<sup>3</sup>。差分吸收激光雷达给出的结果为  $-2.34 \times 10^{10}$  molecules/cm<sup>3</sup>,是由于 SO<sub>2</sub> 的浓度太低,低于测量的灵敏度。但这并不能否定差分吸收激光雷达测量的结果已反映了测量地的 SO<sub>2</sub> 浓度很低。

表 1 差分吸收激光雷达和环保局测量仪器测量的 SO<sub>2</sub> 浓度

Table 1 SO<sub>2</sub> concentration measured by DIAL and analyzer provided by Hefei Environmental Office

Date		3th, Aug.	8th, Aug.	9th, Aug.	12th, Aug.	22th, Aug.
Weather condition		Sunny	Cloudy	Cloudy	Thin drizzle	Cloudy
Visibility /km		20	25	10	7	20
SO <sub>2</sub> concentration	Lidar (average)	14.5	5.92	13.5	0.87	3.8
	Lidar(min. altitude)	2.42	-0.87	-	-	1.5
	/×10 <sup>-9</sup> Analyzer	2.1	-2.4	-	-	0.4

SO<sub>2</sub> analyzer is about 14 m above ground mounted on top of a three-floor builder.

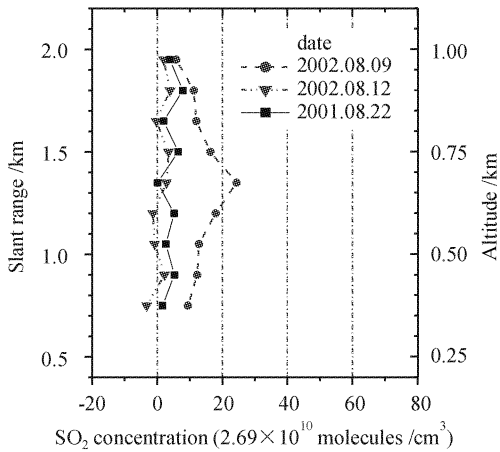


图 3 差分吸收激光雷达探测的 SO<sub>2</sub> 浓度分布  
Fig. 3 SO<sub>2</sub> concentration profiles obtained by DIAL

### 5 误差来源分析

差分吸收激光雷达测量大气 SO<sub>2</sub> 的误差来源主要有回波信号起伏引起的统计误差、气溶胶消光和散射引起的系统误差、其他吸收气体引起的误差以及 SO<sub>2</sub> 吸收截面选择不准确引起的误差。

差分吸收激光雷达测量大气 SO<sub>2</sub> 时,需要很多个激光脉冲的回波信号进行平均或累加,才能明显减小信号的统计起伏。信号的起伏主要是由噪声引起,它包括探测器等电子器件的噪声和天空背景噪声。在差分吸收激光雷达中已采取三种手段来抑制噪声,如使探测器工作在零下 20℃,利用带宽 10 nm 的干涉滤光片以及较长的积分时间等,尽量提高信号的信噪比。我们作了如下的估计,测量 SO<sub>2</sub> 的两个激光波长均采集了 20000 个脉冲的回波信号,分别将同一波长的脉冲回波信号分成两组,如第 1, 3, 5, … 相加,第 2, 4, 6, … 相加,平均后进行差分计算,这两组信号理应没有差别,计算得到的 SO<sub>2</sub> 浓度应为零。计算结果如图 4 所示。从图中可以看到,由于信号的起伏,计算结果不为零。10000 个脉冲的平均效果明显好于 5000 个脉冲平均。5000 个脉冲平均时,可能产生  $4.03 \times 10^{11} \sim 5.38 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup> 的误差,而 10000 个脉冲平均时,产生的误差小于  $2.69 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>。提高激光脉冲发射频率或延长脉冲采集的积分时间有利于减小测量的统计误差。在实际测量中每个激光波长的累计脉冲数为 10000 个,积分时间约 17 min。

气溶胶是差分吸收激光雷达测量环境 SO<sub>2</sub> 的主要误差来源之一。由于大气气溶胶在大气中分布广泛,时空变化较快,光学特性复杂,利用气溶胶模

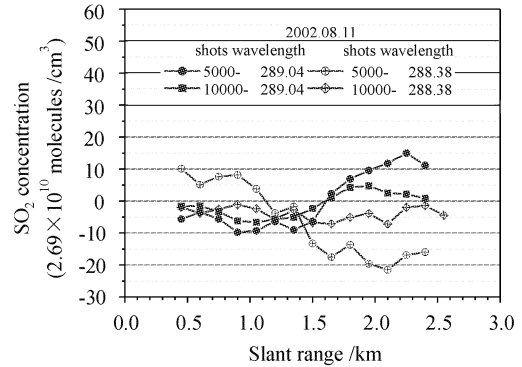


图 4 回波信号起伏引起的测量误差  
Fig. 4 Measurement errors due to fluctuation of return signals

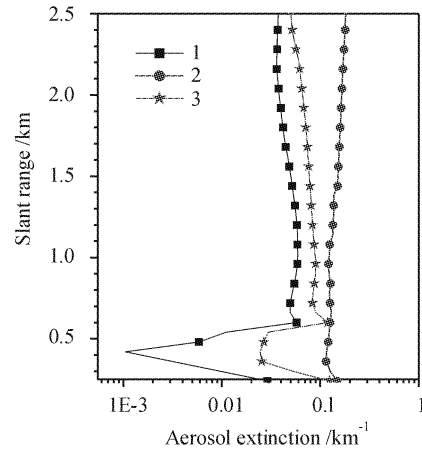


图 5 典型的大气气溶胶斜程分布  
Fig. 5 Typical atmospheric aerosol slant profiles

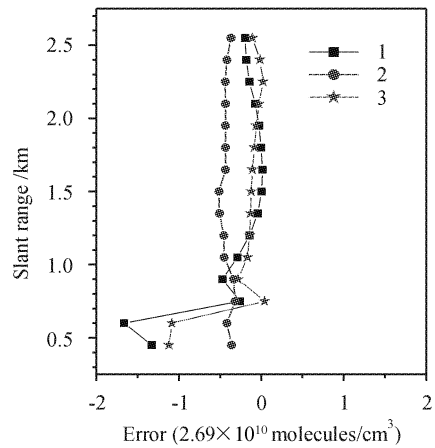


图 6 气溶胶引起的 SO<sub>2</sub> 测量误差  
Fig. 6 SO<sub>2</sub> errors caused by aerosol

式分布难以估计气溶胶散射项的影响。因此,选取三组激光雷达实测的典型分布来估计气溶胶散射和消光对 SO<sub>2</sub> 测量的影响。图 5 给出了 3 条在 532 nm 波长的气溶胶消光系数的斜程分布。从图中可

以看到,气溶胶的斜程分布在 0.3~0.6 之间非常不均匀。如果假设气溶胶的波长散射指数为 2,消光指数为 1,消光后向散射比为 50,那么,通过计算可以得到气溶胶对 SO<sub>2</sub> 测量的影响,如图 6 所示。斜程 0.3~0.6 之间误差较大,但都小于  $5.38 \times 10^{10}$  molecules/cm<sup>3</sup>。

在混合层大气成分中,容易引起 SO<sub>2</sub> 测量误差含量较大的成分主要有 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等。它们在大气中的含量、吸收截面以及对 SO<sub>2</sub> 测量影响的大小如表 2 中估计给出。计算用的 SO<sub>2</sub> 的吸收截面分别采用 Spurr<sup>[9]</sup> 的测量结果。在近地面和混合层 NO<sub>2</sub> 的典型浓度为  $1.34 \times 10^{12}$  molecules/cm<sup>3</sup> ( $50 \times 10^{-9}$ ),按 Vandaele<sup>[10]</sup> 测量的 NO<sub>2</sub> 吸收截面值  $7.5 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup> 和  $7.9 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup> 计算,NO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 测量的影响绝对误差为  $+1.88 \times 10^{10}$  molecules/cm<sup>3</sup>。CH<sub>2</sub>O 的浓度一般小于  $2.69 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>,Meller 等<sup>[11]</sup> 测量 CH<sub>2</sub>O 在 293 K 下的吸收截面为  $4.175 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup> 和  $3.529 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>。利用该吸收截面进行估计,当 CH<sub>2</sub>O 浓度为  $2.69 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup> 时,对 SO<sub>2</sub> 测量的影响为  $-6.18 \times 10^9$  molecules/cm<sup>3</sup>。Burkholder 等<sup>[12]</sup> 在温度 298 K 下测量 HNO<sub>3</sub> 的吸收截面分别为  $6.92 \times 10^{-21}$  cm<sup>2</sup> 和  $6.6 \times 10^{-21}$  cm<sup>2</sup>,当 HNO<sub>3</sub> 浓度为  $2.69 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup> 时,对 SO<sub>2</sub> 测量的影响为  $2.69 \times 10^7$  molecules/cm<sup>3</sup>。CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 在空气中的含量大,体积比浓度比较稳定,但吸收截面却较小,据 Shemansky<sup>[13]</sup> 在 298 K 下测量的 CO<sub>2</sub> 吸收截面结果,吸收截面分别为  $1.87 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup> 和  $1.7 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup>,对 SO<sub>2</sub> 测量影响为  $-5.38 \times 10^7$  molecules/cm<sup>3</sup>。氧分子的吸收非常

弱,在激光雷达测量的波段,起吸收作用的是(O<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 而非 O<sub>2</sub>。Spurr 等<sup>[9]</sup> 在 293 K 下测量的 O<sub>2</sub> 的吸收截面分别为  $4.144 \times 10^{-27}$  cm<sup>2</sup> 和  $3.97 \times 10^{-27}$  cm<sup>2</sup>。氧分子对 SO<sub>2</sub> 测量影响为  $-3.49 \times 10^9$  molecules/cm<sup>3</sup>。水气是低层大气的重要因子,含量极为丰富。在近地面,相对湿度一般在 40%~80%之间。当地面相对湿度为 60%,吸收截面取 Qickenden 等<sup>[14]</sup> 测量值时,水气对 SO<sub>2</sub> 的影响为  $-2.69 \times 10^8$  molecules/cm<sup>3</sup>。O<sub>3</sub> 在混合大气中普遍存在,若以 Spurr 等<sup>[9]</sup> 在 293 K 温度下测量的 O<sub>3</sub> 吸收截面  $1.6802 \times 10^{-18}$  cm<sup>2</sup> 和  $1.5761 \times 10^{-18}$  cm<sup>2</sup> 作估计, O<sub>3</sub> 浓度为  $1.07 \times 10^{12}$  molecules/cm<sup>3</sup> 时,对 SO<sub>2</sub> 测量的影响为  $-3.92 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>。在以上讨论中,O<sub>3</sub> 对 SO<sub>2</sub> 的影响最大,其他的气体成分对 SO<sub>2</sub> 影响都很小。理论上,当 O<sub>3</sub> 浓度较大时,会使测量结果偏小,甚至为负。气溶胶的消光也使测量结果偏小。实际测量情况是,差分吸收激光雷达所在地的空气质量较好,SO<sub>2</sub> 的含量较低,这可以从其他观测仪器的测量结果看到。差分吸收激光雷达测量结果并未出现负的 SO<sub>2</sub> 浓度现象,可能的原因是 O<sub>3</sub> 的浓度较小,对 SO<sub>2</sub> 测量影响不大。当 O<sub>3</sub> 浓度很大时,需要订正 O<sub>3</sub> 的影响。可以用 O<sub>3</sub> 的平均浓度来订正,假如 O<sub>3</sub> 的平均浓度为  $1.07 \times 10^{12}$  molecules/cm<sup>3</sup>,大气中实际的浓度为  $1.34 \times 10^{12}$  molecules/cm<sup>3</sup>,以平均浓度订正后,仍然有一  $9.68 \times 10^{10}$  molecules/cm<sup>3</sup> 的误差,但与不订正的误差 ( $-4.84 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>) 小多了。另外,可以用差分吸收激光雷达测量的 O<sub>3</sub> 分布来订正。我们计划以 288.38~299.05 nm 波长对来测量 O<sub>3</sub> 和订正 SO<sub>2</sub> 的浓度,进一步提高 SO<sub>2</sub> 的探测精度。

表 2 一些吸收气体的吸收截面以及对 SO<sub>2</sub> 测量的影响

Table 2 Cross sections of absorption gases and their effects on SO<sub>2</sub> measurements

Gases	Absorption cross section		Differential absorption cross section /nm	Mixing ratio	Errors of SO <sub>2</sub> / $\times 10^{-9}$
	288.38 nm	289.04 nm			
SO <sub>2</sub>	$6.6894 \times 10^{-19}$	$9.5255 \times 10^{-19}$	$2.836 \times 10^{-19}$		
O <sub>3</sub>	$1.6802 \times 10^{-18}$	$1.5761 \times 10^{-18}$	$1.041 \times 10^{-19}$	$40 \times 10^{-9}$	-14.6
NO <sub>2</sub>	$7.5 \times 10^{-20}$	$7.9 \times 10^{-20}$	$-4.0 \times 10^{-21}$	$50 \times 10^{-9}$	0.7
CH <sub>2</sub> O	$4.175 \times 10^{-20}$	$3.529 \times 10^{-20}$	$6.46 \times 10^{-21}$	$10 \times 10^{-9}$	-0.23
CO <sub>2</sub>	$1.87 \times 10^{-25}$	$1.7 \times 10^{-25}$	$1.7 \times 10^{-26}$	0.00033	-0.002
O <sub>2</sub>	$4.144 \times 10^{-27}$	$3.97 \times 10^{-27}$	$1.74 \times 10^{-28}$	0.21	-0.13
HNO <sub>3</sub>	$6.92 \times 10^{-21}$	$6.6 \times 10^{-21}$	$3.2 \times 10^{-22}$	$10 \times 10^{-9}$	-0.001
H <sub>2</sub> O	$9.284 \times 10^{-27}$	$9.044 \times 10^{-27}$	$2.4 \times 10^{-28}$	0.012	-0.01

SO<sub>2</sub> 吸收截面选取误差也会产生 SO<sub>2</sub> 浓度计算的不准。精确测量 SO<sub>2</sub> 吸收截面是一件比较困

难的工作。SO<sub>2</sub> 在光照下非常不稳定,这给吸收截面的测量工作带来复杂性和困难性。通常 SO<sub>2</sub> 吸

收截面是随温度变化的。在不同的温度下,SO<sub>2</sub> 的吸收截面是不同的。就是在同一温度下,不同测量者得到的吸收截面也并非完全一致。根据 Vandaele 等<sup>[15]</sup> 的比较,差别大的可达到 25%。文献[9]给出的测量误差为 3%。差分吸收激光雷达的两个波长是在高压氙气和甲烷中产生的,会产生压力展宽,大气中不同高度的温度也不一样。这些因素都会给 SO<sub>2</sub> 吸收截面的选取带来困难。

## 6 结 论

利用 Nd:YAG 四倍频激光抽运甲烷和氙气的拉曼散射波长可以用来测量环境中的 SO<sub>2</sub>。在合肥市董铺岛进行实际测量,测量结果与环保局仪器测量结果具有可比性,测量结果的偏差一般小于  $2.69 \times 10^{11}$  molecules/cm<sup>3</sup>,误差来源分析表明,统计误差是测量误差的主要来源,提高激光脉冲发射频率或延长脉冲采集的积分时间有利于减小测量的统计误差。当 O<sub>3</sub> 浓度很大时也会带来较大的测量误差,需要订正 O<sub>3</sub> 引起的误差。可以利用 O<sub>3</sub> 的平均浓度或其他手段测量 O<sub>3</sub> 的分布消除大部分的影响。

## 参 考 文 献

- 1 K. Fredriksson, B. Galle, K. Nystrom *et al.*. Mobile lidar system for environmental probing [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20** (24):4181~4189
- 2 T. Fujii, T. Fukuchi, N. Goto *et al.*. Dual differential absorption lidar for the measurement of atmospheric SO<sub>2</sub> of the order of parts in 10<sup>9</sup>[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(6):949~956
- 3 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):597~601  
胡顺星,胡欢陵,吴永华等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. 光学学报, 2004, **24**(5):597~601
- 4 Uta-Barbara Goers. Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar ARGOS [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(11):3097~3102
- 5 Shunxing Hu, Huanling Hu, Yinchao Zhang *et al.*. A new differential absorption lidar for NO<sub>2</sub> measurements using Raman-shifted technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8):435~437
- 6 H. J. Kölsch, P. Rairoux, J. P. Wolf *et al.*. Simultaneous NO and NO<sub>2</sub> DIAL measurement using BBO crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(11):2052~2056
- 7 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
- 8 R. M. Schotland. Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1974, **13**(1):71~77
- 9 R. Spurr, W. Thomas. GOME Software Databases for Level 1 to 2 Processing [R]. ER-TN-IFE-GO-0018, Iss./Rev. 3/A, Universität Bremen-Institut für Fernerkundung, July 2002. 14~14
- 10 A. C. Vandaele, C. Hermans, P. C. Simon *et al.*. Measurements of the NO<sub>2</sub> absorption cross-section from 42000 cm<sup>-1</sup> to 10000 cm<sup>-1</sup> (238~1000 nm) at 220 K and 294 K [J]. *J. Quantum Spectr. Rad. Transfer.*, 1998, **59**(3-5):171~184
- 11 R. Meller, G. K. Moortgat. Temperature dependence of the absorption cross sections of formaldehyde between 223 and 323 K in the wavelength range 225~375 nm [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D6):7089~7101
- 12 J. B. Burkholder, R. K. Talukdar, A. R. Ravishankara *et al.*. Temperature dependence of the HNO<sub>3</sub> UV absorption cross sections [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D12):22937~22948
- 13 D. E. Shemansky. CO<sub>2</sub> extinction coefficients 1700~3000 Å, temperature 298 K [J]. *J. Chem. Phys.*, 1972, **56**(4):1582~1588
- 14 T. I. Quickenden, J. A. Irvin. The ultraviolet absorption spectrum of liquid water [J]. *J. Chem. Phys.*, 1980, **72**(8):4416~4428
- 15 A. C. Vandaele, P. C. Simon, J. M. Guilmet *et al.*. SO<sub>2</sub> absorption cross section measurement in the UV using a Fourier transform spectrometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (D12):25599~25605