

差分吸收激光雷达探测二氧化硫实验研究

林金明^{1,2}, 曹开法¹, 胡顺星¹, 黄 见¹, 苑克娥¹, 时东锋¹, 邵石生¹, 徐之海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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 二氧化硫是大气中最常见、最重要的污染物之一。差分吸收激光雷达探测二氧化硫具有高时空分辨率、高探测精度等优点。用两台 Nd:YAG 激光器泵浦两台染料激光器后,通过倍频晶体得到测量大气二氧化硫所需的两个波长,它们分别是 $\lambda_{on}=300.05\text{ nm}$ 和 $\lambda_{off}=301.5\text{ nm}$ 。将两束光束用几组反射镜合为一束光束,经扩束镜 6 倍扩束后垂直发射进入到大气中。接收望远镜收集两个激光波长的大气后向散射信号,信号采集单元记录两个波长的后向散射回波信号的垂直高度分布。通过数据反演获得二氧化硫的高度分布。初步实验结果表明,实验期间合肥西郊董铺岛垂直高度 0.3~1.6 km 的二氧化硫在 0~14 ppb 范围内波动。最后分析并估算了该二氧化硫差分吸收激光雷达的四个主要误差来源。

关键词: 差分吸收激光雷达; 二氧化硫; 大气光学

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0872-07

Experiment study of SO₂ measurement by differential absorption lidar

Lin Jinming^{1,2}, Cao Kaifa¹, Hu Shunxing¹, Huang Jian¹, Yuan Ke'e¹,
Shi Dongfeng¹, Shao Shisheng¹, Xu Zhihai¹

1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sulfur dioxide (SO₂) is one of the most common and important pollutant in the atmosphere. Differential absorption lidar (DIAL) measurement of SO₂ has the advantages of high space-time resolution and high precision. Two laser beams, produced by two dye lasers pumped by two Nd:YAG lasers, were frequency doubled by two second-harmonic crystals, respectively. The dual wavelengths of $\lambda_{on}=300.05\text{ nm}$ and $\lambda_{off}=301.5\text{ nm}$ were selected to probe atmospheric SO₂. One beam of light was achieved by merging two laser beams via several mirrors, and this laser beam was expanded sixfold with a beam expander and then transmitted vertically into the atmosphere. Backscattered radiation of both wavelengths was received by the telescope and acquired by data acquisition unit. Based on the storage data, the vertical concentration profiles of SO₂ can be inversion. Preliminary result during experiment shows that SO₂ concentration is roughly from 0 to 14 ppb at altitude ranging from 0.3 km to 1.6 km over Dongpu island, west suburb of Hefei city. At last, four major measurement errors of this SO₂ DIAL were analyzed and estimated.

Key words: DIAL; SO₂; atmospheric optics

收稿日期:2014-07-07; 修订日期:2014-08-18

基金项目:国家重大科研仪器设备研制专项(41127901);青年科学基金(41205020)

作者简介:林金明(1990-),男,硕士生,主要从事差分吸收激光雷达大气痕量气体探测方面的研究。Email:jmlin@aiofm.ac.cn

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

0 引言

二氧化硫(SO₂)是大气中最常见、最重要的污染物之一。SO₂的来源包括人为排放和自然释放两个方面,其中人为排放是其主要来源。人为排放一般是通过矿物质和化石燃料的燃烧产生SO₂,同时自然界中的火山爆发也会释放一定量的SO₂。作为一种无色、有刺激性气味的气体,SO₂对人体、动植物以及自然环境都有一定的危害。人体吸入SO₂后主要会对呼吸器官造成损伤,可导致支气管炎、肺炎,严重者致肺水肿和呼吸麻痹。大气中的SO₂沉降到地面后会使水土酸化,影响动植物的正常生长。SO₂在大气中可与水分和尘埃结合形成气溶胶,并逐渐氧化成硫酸或硫酸盐,参与到酸雨和硫酸烟雾的形成,对环境危害很大^[1-2]。鉴于上述危害,各国政府对SO₂排放的监测都十分重视。

差分吸收激光雷达技术首先由美国科学家Schotland^[3]在20世纪70年代提出,用来反演大气中的水汽含量。近年来该技术广泛用于诸如SO₂、NO₂等微量气体的监测。差分吸收激光雷达探测SO₂具有高时空分辨率、高探测精度等优点,可实时快捷地获得SO₂的时空分布。Fredriksson等^[4]报道了用Nd:YAG激光泵浦染料激光器作为光源的车载环境监测激光雷达系统,测量大气中的SO₂时选择的激光波长对为299.30~300.05 nm。Goers等^[5]则选择280.91~282.72 nm波长对来测量大气中的SO₂。Takashi等^[6]研制了双差分吸收激光雷达来测量SO₂,该系统用两台Nd:YAG激光去泵浦两台染料激光器经倍频后获得所需要的测量波长:λ_{on1}=298.65 nm, λ_{off1}=λ_{off2}=299.35 nm, λ_{on2}=300.05 nm,该系统可以测到大气中含量为1.2 ppb(1ppb=10⁻⁹)的SO₂。中国科学院安徽光学精密机械研究所^[7]也研制了用于测量SO₂的差分吸收激光雷达AML-2,该系统用拉曼频移的方法获得测量所需的波长对:288.38~289.04 nm。

此文首先阐述了差分吸收激光雷达的基本测量原理,然后详细介绍了自主研制的SO₂差分吸收激光雷达的系统结构,并给出了SO₂浓度分布的实测结果,验证了该差分吸收激光雷达已具有测量SO₂浓度分布的能力,最后分析了差分吸收激光雷达探测SO₂的四个主要误差来源。

1 差分吸收激光雷达原理

差分吸收激光雷达测量方法的基本原理是利用待测气体的吸收特性测量该气体的浓度。差分吸收激光雷达发射两种波长非常接近的激光脉冲,一个波长位于待测气体分子的吸收峰,记为λ_{on},而另一种波长位于待测气体分子的吸收谷,记为λ_{off},将两种波长回波信号强度进行反演即可确定测量路径上不同探测距离处所含待测气体的浓度。

在高度z处待测气体分子的数密度可表示为^[8]:

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

式中:

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

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

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

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

式中:Δσ为待测气体分子在波长λ_{on}和λ_{off}处的吸收截面差;σ(λ_{on})、σ(λ_{off})分别为待测气体分子在波长λ_{on}、λ_{off}处的吸收截面;P(λ_{on}, z)、P(λ_{off}, z)为λ_{on}、λ_{off}波长在高度z处的激光雷达信号;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以及大气分子消光作用项,统称为修正项;β(λ_{on}, z)、β(λ_{off}, z)为高度z处λ_{on}、λ_{off}波长大气总的后项散射系数;α_A(λ_{on}, z)、α_A(λ_{off}, z)为高度z处λ_{on}、λ_{off}波长大气气溶胶的消光系数;α_M(λ_{on}, z)、α_M(λ_{off}, z)为高度z处λ_{on}、λ_{off}波长大气气溶胶的消光系数。

若λ_{on}和λ_{off}相差很小,则B、E_A及E_M可以忽略不计,式(1)可简化为:

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

实际计算时,并不是直接算出待测气体在z处的浓度,而是算z到z+Δz之间的平均值,Δz称为差分距离,则式(6)可表示为:

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

2 SO₂ 差分吸收激光雷达系统结构

该 SO₂ 差分吸收激光雷达位于合肥西郊董铺岛, 远离污染物排放源, 只有少量的住家, SO₂ 的含量比较少。该激光雷达系统主要由激光发射、回波信号接收及信号采集三部分组成, 其具体结构框图如图 1 所示。

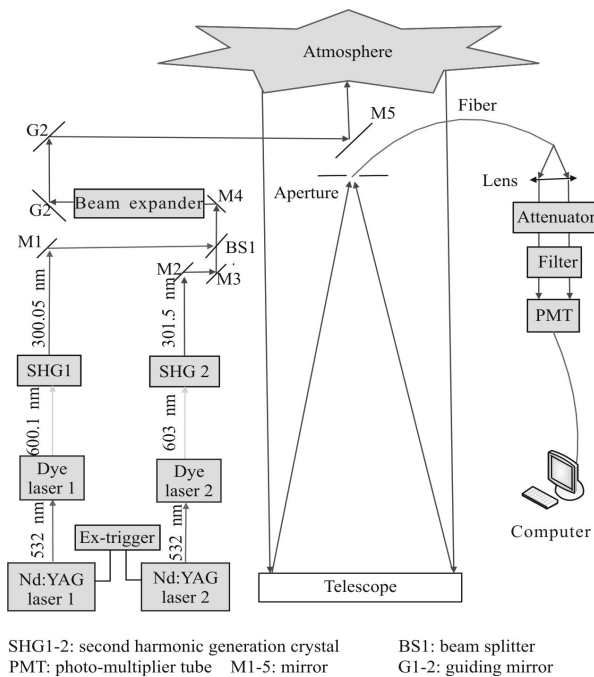


图 1 SO₂ 差分吸收激光雷达系统结构图

Fig.1 Schematic of SO₂ DIAL system

首先, 采用自主研发的时分复用逻辑电路输出信号作为两台美国 Continuum 公司生产的 Powerlite 8050 型 Nd:YAG 激光器的氙灯外触发信号。该逻辑电路交替产生两路 10 Hz 的触发信号, 使激光器氙灯工作, 这样两台 Nd:YAG 激光器交替产生激光脉冲, 使最后采集到的 λ_m 信号与 λ_{off} 信号严格区分开来。两台 Nd:YAG 激光器均产生波长为 1064 nm 的基频光, 通过激光器内部的二倍频单元后输出 532 nm 的激光。将两束 532 nm 的激光通过反射镜导入到两台德国 Radiant Dyes Laser 公司的 NarrowScan Plusd 型染料激光器的入光孔中。两台激光器的振荡级与放大级染料瓶均用纯度为 99.96% 的 RH 级乙醇作为染料的溶液。对于输出波长为 600.1 nm 的染料激光器选取的染料为 Rhodamine B, 经试验后取其振荡

级浓度为 0.2 g/L, 放大级浓度为 0.04 g/L。而对于输出波长为 603 nm 的染料激光器, 采用和上一台染料激光器相同染料及其染料浓度。将染料激光器输出的 600.1 nm 及 603 nm 激光光束分别通过两块倍频晶体后, 获得 300.05 nm 和 301.5 nm 激光波长。300.05 nm 对应于 SO₂ 吸收的一个峰值, 作为 λ_m ; 301.5 nm 处于 SO₂ 吸收的一个谷值, 作为 λ_{off} 。

对于 300.05 nm 的激光光束通过全反射镜 M1 后入射到分束镜 BS1, 经 BS1 反射后激光朝全反射镜 M4 的方向行进。将此光路作为调整另一束激光光路的标准。而对于 301.5 nm 的激光光束, 依次通过全反射镜 M2、M3 后到达 BS1, 经 BS1 透射后也向着 M4 的方向行进, 通过反复优化调节 M2、M3 的调节螺纹使 301.5 nm 的激光光束与 300.05 nm 的激光光束经 BS1 后合为一束光束。整合后的光束经全反射镜 M4 后到达扩束镜, 经扩束镜扩束至 6 倍光束, 然后依次通过导向镜 G1、G2 到达安装在望远镜的全反射镜 M5。M5 与望远镜轴线成 45° 夹角, 通过调节 G1、G2 使发射光束与接收望远镜同轴并入射到大气中。

入射到大气中的激光光束与大气中的 SO₂ 作用后产生的后向散射信号用口径为 300 mm 的近牛顿式望远镜接收, 其焦距为 750 mm, 接收视场为 0.2~2 mrad。回波信号经望远镜反射后到达望远镜的焦点处, 经过一个可调节的小孔光阑后由数值孔径为 0.22 mm、芯径为 1.5 mm 的传能光纤导出, 然后经准直镜变成平行光光束。该光束首先经过一块衰减片, 然后经过中心波长 (CWL) 为 300.75 nm、半带宽 (FWHM) 为 3 nm 的窄带滤光片后到达英国 ET 公司的 9142 型光电倍增管, 将光信号变成了电信号。信号由 ADLINK 公司的 PCI-9846H 型 A/D 数据采集卡记录并存储测得的数据到计算机中, 该采集卡的触发信号由两台 Nd:YAG 激光器的 Q-switch 输出信号提供, 为后期提取存储数据提供判断依据。为减小实验数据所占计算机的存储空间, 将测得信号存为二进制文件。最后用数据处理程序反演出 SO₂ 的浓度分布。

3 SO₂ 垂直浓度分布实验结果

2013 年 11 月 29 日 10 时 09 分利用该差分吸收

激光雷达系统进行了 SO₂ 浓度的观测实验, 当时天气晴朗, 微风, 高空有云。其 0~9 km 的原始回波信号分布如图 2 所示。

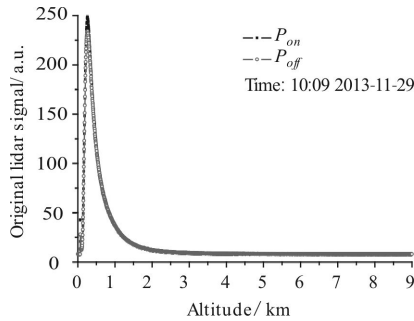


图 2 原始回波信号分布图

Fig.2 Curves of original echo signal

原始回波信号包含了激光雷达光信号、天空背景光噪声以及各种电子学噪声等。一般将天空背景光噪声、光电倍增管暗电流、电子学热噪声及电磁干扰信号统称为广义的背景噪声。这样可以把激光雷达接收到的回波信号分成两部分: 激光雷达接收到的后向散射回波信号和背景噪声。后向散射回波信号是有用的信号, 用以反演激光雷达测量的物理量。而背景噪声是需要消除或减少的。原始信号处理就是要保留有用的后向散射回波信号, 消除或降低背景噪声。激光雷达扣除背景主要有两种方法: 第一种是采集一组激光雷达回波信号后, 紧接着不发射激光光束, 测一组纯背景信号, 然后用一组激光雷达回波信号减去此纯背景信号; 第二种是每组回波信号在无信号或者信号远小于背景噪声的区间的平均值作为背景信号, 然后在整个测量区间内, 将此背景值减去, 此方法节省了测量纯背景所需的时间。但是激光雷达信号扣除了背景噪声后, 仍然存在大气介质散射和光电倍增管量子效应引起的统计噪声。特别是当回波信号较弱时, 波动往往很大, 因此对扣除背景后的回波信号进行降噪处理非常重要。对激光雷达的信号通常采用分段权重平滑的方式来降噪。权重平滑主要是根据信号特点选取权重系数对信号进行平滑处理, 从而削弱信号随机起伏噪声及大气波动对激光雷达信号造成的影响。平滑时在不引起信号失真的前提下, 应尽可能地减小随机噪声^[9]。

采用第二种扣除背景噪声的方法, 以 7~9 km 所采集原始回波信号的平均值作为背景噪声, 并对扣

除背景噪声后的信号进行分段权重平滑的方式降噪。0~2 km 范围内经扣除背景噪声和分段权重平滑降噪处理后的回波信号与原始回波信号对比如图 3 所示。

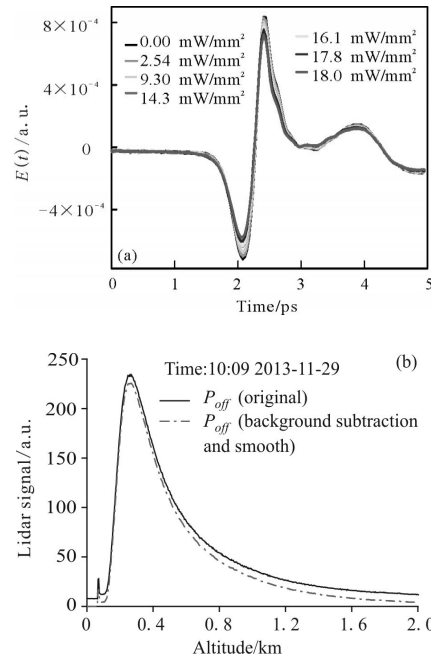


图 3 扣除背景和平滑后信号与原始回波信号对比图

Fig.3 Contrast curves of background subtraction and smooth with original echo signal

从图 3 可见, 经扣除背景噪声和分段权重平滑降噪处理后 0~2 km 的回波信号细节并未丢失。Vandaele^[10]等在 298 K 测量的 SO₂ 吸收截面值大小, 则其吸收截面差 $\Delta\sigma=1.005\times 10^{-18}$ cm²/molec, 取式(7)中的差分距离 $\Delta z=300$ m, 可反演得到 SO₂ 的浓度分布。为进一步减小大气抖动带来影响, 对结果再次进行适当的平滑处理。则 0.3~1.7 km 范围内 SO₂ 随高度分布的廓线如图 4 所示。

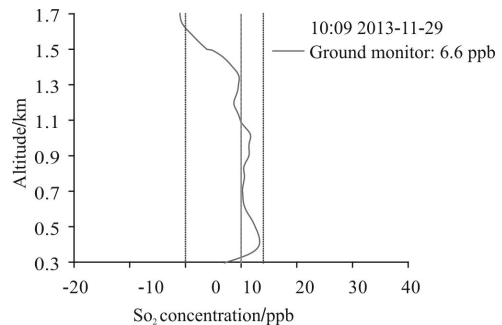


图 4 SO₂ 浓度分布廓线

Fig.4 SO₂ concentration profiles

从图 4 可以看出,在 0.3~1.6 km 范围内,SO₂ 浓度在 0~14 ppb 范围内波动,其平均值为 9.8 ppb。PM2.5 网站(<http://www.pm25.in/hefei>)每小时会公布合肥董铺岛的 SO₂ 浓度,其测量仪器与该差分吸收激光雷达的直线距离约为 200 m,不过该测量仪器只能测量离地面高度约为 20 m 处的 SO₂ 浓度。PM 2.5 网站公布的 2013 年 11 月 29 日 10 时董铺岛 SO₂ 浓度为 6.6 ppb,与反演结果基本符合。1.6 km 以后反演结果为负值,可能是由于回波信号的信噪比太低而引起的。而 0~0.3 km 为该激光雷达探测的盲区和过渡区,故未给出其 SO₂ 浓度反演结果。

4 误差来源分析

差分吸收激光雷达测量 SO₂ 误差有多种来源,其中主要来源包括回波信号的随机起伏引起的统计误差、气溶胶消光和散射引起的系统误差、其它干扰吸收气体引起的误差以及 SO₂ 吸收截面值的不确定性造成的误差。

4.1 回波信号的随机起伏引起的统计误差

差分吸收激光雷达探测的大气后向散射回波信号具有随机起伏的特征。当用 A/D 方式采集时,其随机起伏方差 $\delta P(\lambda_0, z)/P(\lambda_0, z)$ 可表示为^[11]:

$$\frac{\delta P(\lambda_0, z)}{P(\lambda_0, z)} = \frac{\sqrt{NSF^2 \cdot P(\lambda_0, z) + \delta_b^2 + (\delta_b / \sqrt{N_b})^2}}{P(\lambda_0, z)} \quad (8)$$

式中: $P(\lambda_0, z)$ 为波长在高度 z 处的激光雷达信号; NSF 为激光雷达噪声比例因子,可以通过激光雷达背景信号计算得到; δ_b 为背景信号的标准误差; N_b 代表计算背景信号误差时所取数据个数。

由差分吸收激光雷达的反演公式可得到,信号的起伏误差会引起的 SO₂ 测量统计误差 δN_{so_2} 为:

$$\delta N_{so_2} = \frac{1}{2\Delta z \Delta \sigma} \ln \left(1 + \frac{\delta P(\lambda_0, z)}{P(\lambda_0, z)} \right) \quad (9)$$

式中: Δz 为差分距离; $\Delta \sigma$ 为 λ_{on} 和 λ_{off} 激光波长处的吸收截面差。

则对上文中的实验数据,其统计误差随高度的分布如图 5 所示。

从图 5 可见,在 0.3~1.6 km 范围的统计误差随着高度的增加而增大,在 1.6 km 处达到了 10 ppb。在该 SO₂ 差分吸收激光雷达系统中采取了如下措施来减

少统计误差:利用窄带滤光片抑制天空的背景;进行 2000 个脉冲累积测量;以 7~9 km 所采集原始回波信号的平均值作为背景噪声,对原始信号扣除背景噪声;对扣除背景噪声后的信号进行权重平滑等。

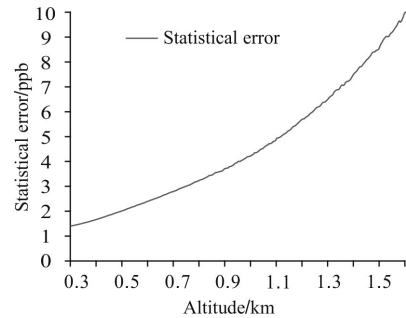


图 5 二氧化硫差分吸收激光雷达统计误差

Fig.5 SO₂ DIAL statistical error

4.2 气溶胶消光和散射引起的系统误差

从理论上讲,当两束激光波长差别不是很大时,其对应的气溶胶散射和消光特性也应该差别不大。

假设采用美国标准大气模式中的大气分子消光和气溶胶消光模式,在波长 532 nm 处大气分子和气溶胶后向散射吸收可以分别由下式表示为^[12]:

$$\beta_A(532 \text{ nm}, z) = 2.47 \times 10^{-3} \exp(-z/2) + 5.13 \times 10^{-6} \exp(-(z-20)^2/36) \quad (10)$$

$$\alpha_A(532 \text{ nm}, z) = \beta_A(532 \text{ nm}, z) \times 50 \quad (11)$$

$$\beta_M(532 \text{ nm}, z) = 1.54 \times 10^{-3} \exp(-z/7) \quad (12)$$

$$\alpha_M(532 \text{ nm}, z) = \beta_M(532 \text{ nm}, z) \times 8\pi/3 \quad (13)$$

不同波长的分子和气溶胶消光系数可表示为^[13]:

$$\alpha_A(\lambda, z) = \left(\frac{532}{\lambda} \right) \alpha_A(532 \text{ nm}, z) \quad (14)$$

$$\alpha_M(\lambda, z) = \left(\frac{532}{\lambda} \right)^4 \alpha_M(532 \text{ nm}, z) \quad (15)$$

图 6 显示了在美国标准大气模式条件下的大气后向散射作用项随高度的变化图,可以看出对所选波长的大气后向散射作用项 B 的数值较小,最大值不到 0.16 ppb。图 7 则显示了采用的大气模式条件下的气溶胶消光作用项 E_A 和大气分子消光作用项 E_M 随高度的变化图,这两项均稍大于 B 修正项,其最大值分别为 0.89 ppb 和 0.34 ppb。故在气溶胶相对小于该美国标准大气模式的条件下,可以不考虑修正项 B 、 E_A 及 E_M 的影响。

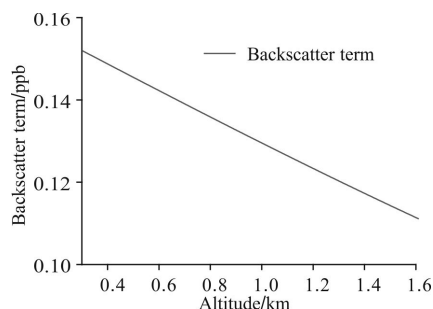


图 6 美国标准大气模式下大气后项散射作用项随高度的变化图

Fig.6 Under U.S. standard atmosphere the change of backscatter term with altitude

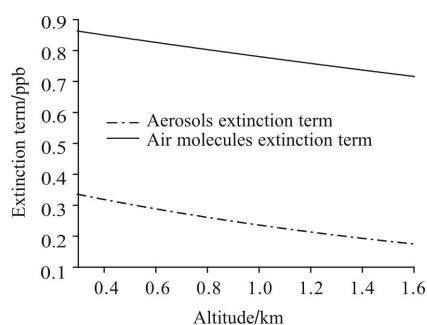


图 7 美国标准大气模式下消光作用项随高度的变化图

Fig.7 Under U.S. standard atmosphere the change of extinction term with altitude

4.3 其他干扰吸收气体引起的误差

文中主要讨论混合层大气成分中的臭氧(O₃)和二氧化氮(NO₂)引起的差分吸收激光雷达 SO₂ 探测误差。选取在 $\lambda_{on}=300.05\text{ nm}$ 和 $\lambda_{off}=301.5\text{ nm}$ 两个波长上 O₃^[14] 和 NO₂^[15] 的吸收截面差分别为 $\Delta\sigma_{NO_2}=0.007\times 10^{-19}\text{ cm}^2/\text{molec}$ 和 $\Delta\sigma_{O_3}=0.6937\times 10^{-19}\text{ cm}^2/\text{molec}$, 忽略 O₃ 吸收引起的 SO₂ 浓度测量误差可表示为:

$$\varepsilon_{O_3} = \frac{N_{O_3} \cdot \Delta\sigma_{NO_2}}{N_{SO_2} \cdot \Delta\sigma_{SO_2}} \times 100\% \quad (16)$$

如果 O₃ 和 SO₂ 的浓度相同,则由前面所选吸收截面差可得,O₃ 吸收对 SO₂ 浓度的影响为 6.9%,会使测量结果偏大。

忽略 NO₂ 吸收引起的 SO₂ 浓度测量误差可表示为:

$$\varepsilon_{NO_2} = \frac{N_{O_3} \cdot \Delta\sigma_{NO_2}}{N_{SO_2} \cdot \Delta\sigma_{SO_2}} \times 100\% \quad (17)$$

如果 NO₂ 和 SO₂ 的浓度相同,则由前面所选吸收截面差可得。NO₂ 吸收对 SO₂ 浓度的影响为

0.069%。

合肥地区近地面的 SO₂ 和 NO₂ 的浓度一般差别不大,故 NO₂ 对 SO₂ 的影响可忽略。而合肥地区近地面的 O₃ 浓度一般大于 SO₂ 浓度,故反演时需要考虑臭氧的影响。可以采取以下两种手段来减少 O₃ 的影响:第一种是采用三波长双差分的方法来测量 SO₂ 的浓度分布;第二种是首先用 O₃ 的吸收峰与吸收谷波长对测出 O₃ 的实际浓度,然后修正其对 SO₂ 带来的影响。

4.4 二氧化硫吸收截面值的不确定性造成的误差

精确测量 SO₂ 吸收截面是一件比较困难的事。SO₂ 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 SO₂ 吸收截面又是随温度变化。在不同的温度下,SO₂ 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。文中所选 Vandaele 测量 SO₂ 在 298 K 条件下的吸收截面值的系统误差约为 3.8%^[10],不过该吸收截面数值带来的误差一般可以忽略。

5 结论

文中用两台输出波长为 532 nm 的 Nd:YAG 激光器去泵浦两台染料激光器得到 600.1 nm 及 603 nm 的激光光束,通过倍频晶体获得测量 SO₂ 所需的 300.05 nm 吸收峰波长及 301.5 nm 吸收谷波长激光。通过反射镜将输出的两束光束合为一束光束,经 6 倍扩束后发射进入到大气中。后向散射回波信号由接收望远镜接收、信号采集单元采集并保存。反演得到了 2013 年 11 月 29 日 10 时 09 分合肥西郊董铺岛垂直距离 0.3~1.6 km 的 SO₂ 在 0~14 ppb 范围内波动,其平均值为 9.8 ppb。证实了该差分吸收激光雷达系统已具有测量 SO₂ 浓度分布的能力。最后分析并计算了该差分吸收激光雷达测量 SO₂ 的四个主要误差来源:回波信号的随机起伏引起的统计误差、气溶胶消光和散射引起的系统误差、其它干扰吸收气体引起的误差以及 SO₂ 吸收截面值的不确定性造成的误差。通过计算可知,其中回波信号的随机起伏引起的系统误差占主导地位。而提高该系统的稳定性和探测精度、完善反演算法等将是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] Liu Qi. Environmental Chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
刘琦. 环境化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] Tang Xiaoyan, Li Jinlong, Li Xin, et al. Atmosphere Environmental Chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. (in Chinese)
唐孝炎, 李金龙, 栗欣, 等. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [3] 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, 1966.
- [4] Fredriksson K, Galle B, Nystrom K, et al. Mobile lidar system for environmental probing [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(24): 4181-4189.
- [5] Goers U B. Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(11): 3097-3102.
- [6] 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.
- [7] Hu Shunxing, Hu Huanling, Zhang Yinchao, et al. Differential absorption lidar for environmental SO₂ measurements [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31 (9): 1121-1126. (in Chinese)
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.
- [8] Weitkamp C. Lidar Range Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc., 2005.
- [9] Sun Jingqun. Lidar Atmospheric Detection [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
孙景群. 激光大气探测 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [10] Vandaele A C, Hermans C, Fally S. Fourier transform measurements of SO₂ absorption cross sections: II. temperature dependence in the 29 000-44 000 cm⁻¹ (227-345 nm) region [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(18): 2115-2126.
- [11] Liu Zhaoyan, Hunt W, Vaughan M, et al. Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4437-4447.
- [12] Sasano Y, Kobayashi T. Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment [R]. Japan: NIES, 1995.
- [13] Uchino O, Tabata I. Mobile lidar for simultaneous measurements of ozone, aerosols, and temperature in the stratosphere [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 2005-2012.
- [14] Serdyuchenko A, Gorshchev V, Weber M, et al. New broadband high-resolution ozone absorption cross-sections [J]. *Spectroscopy of Europe*, 2011, 23(6): 3.
- [15] Voigt S, Orphal J, Burrows J P. The temperature and pressure dependence of the absorption cross-sections of NO₂ in the 250-800nm region measured by Fourier-transform spectroscopy [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology Chemistry*, 2002, 149(1-3): 1-7.