

大尺度区域 CO₂ 和 H₂O 的激光在线检测技术

何 莹¹ 张玉钧¹ 王立明¹ 尤 坤¹ 孙晓敏² 刘振民²

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)
(² 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要 CO₂ 和 H₂O 是大气中两种重要的温室气体,对生态系统中 CO₂ 和 H₂O 的浓度进行在线监测可用于分析环境及气候变化。选择 CO₂ 和 H₂O 的近红外吸收谱线,利用可调谐半导体激光吸收光谱技术结合自动增益调节技术设计了开放式 CO₂ 和 H₂O 在线检测仪。在中国科学院禹城综合试验站进行了 1238 m 光程下,20 Hz 时间分辨率的连续观测实验,结果表明自动增益调节解决了开放光路检测时探测信号幅度大幅变化问题。监测点的 CO₂ 浓度具有白天低,夜间高的日变化周期性。与同场地涡度相关系统的 LI-7500 对比测量,数据一致性较好。该检测技术灵敏度高、响应速度快、免采样,实现了大尺度区域生态系统中 CO₂ 和 H₂O 浓度的稳定、连续、在线检测。

关键词 激光技术; 大尺度区域; 自动增益调节; 温室气体

中图分类号 O443.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0115003

Laser Technology for CO₂ and H₂O On-Line Detection in Large-Scale Region

He Ying¹ Zhang Yujun¹ Wang Liming¹ You Kun¹ Sun Xiaomin² Liu Zhenmin²

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

²Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract CO₂ and H₂O are the important greenhouse gases in the atmosphere. On-line monitoring of CO₂ and H₂O concentrations in ecosystem can be used for analyzing environment and climate change. With the near-infrared absorption lines of CO₂ and H₂O, CO₂ and H₂O on-line detection instrument in open-path based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology and automatic gain adjustment technology is designed. The continuous observation experiment is carried out in Yucheng Integrated Experimental Station, Chinese Academy of Sciences with the time resolution of 20 Hz in 1238 m optical path by this instrument. The results show that the problem of large signal intensity fluctuation in open-path detection is solved by automatic gain adjustment. The CO₂ concentration in site has an obvious diurnal periodicity that the concentration is low in the daytime and high at night. Comparing with LI-7500 of eddy covariance system, the data consistency is better. This technology has the characteristics of high sensitivity, fast response and without sampling, so the stable and continuous CO₂ and H₂O on-line detection is achieved in large-scale regional ecosystem.

Key words laser technique; large-scale region; automatic gain adjustment; greenhouse gas

OCIS codes 300.6260; 300.1030; 010.0280

1 引 言

CO₂ 和 H₂O 是大气中两种非常重要的温室气体。H₂O 在地球的辐射平衡中起重要作用,CO₂ 引起了全球约 60% 的温室效应。因此,对环境大气中

的 CO₂ 和 H₂O 浓度进行高灵敏在线监测,并了解其分布、传输和季节变化情况,对于研究碳水循环、掌握局地气候变化、治理环境等方面意义重大^[1-2]。

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)^[3-6]技

收稿日期: 2013-08-05; **收到修改稿日期**: 2013-08-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-JS408)、中国科学院重大科研装备研制项目(YZ200709)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ220119)、中国科学院合肥物质科学研究院青年人才基金(Y03RC21122)

作者简介: 何 莹(1983—),女,硕士,助理研究员,主要从事基于激光吸收光谱技术的痕量气体检测方法及应用等方面的研究。E-mail: heyings@aiofm.ac.cn

术结合开放光路进行目标痕量气体的激光探测和测量,具有高时空分辨率、高灵敏、高选择性的特点,不受采样地点、局部通量、风速大小等因素的限制。在开放式监测过程中,由于大气能见度变化等因素影响,导致探测信号的幅度变化较大,不能满足信号采集的需要,降低了测量准确性。为了调节探测信号幅度以满足模/数(A/D)采集需要,实现气体浓度的长期稳定测量,需要利用自动增益调节技术,提高吸收谱线测量的自动化水平。

本文研究了大尺度区域生态环境中 CO₂ 和 H₂O 的 TDLAS 在线检测技术,设计了开放式 CO₂ 和 H₂O 在线检测仪。重点研究了自动增益调节方法和气体浓度反演方法。在中国科学院禹城综合试验站完成了大尺度区域外场实验,并与同场地涡度相关系统的 LI-7500 对比测量,验证了本检测技术的可行性。

2 仪器设计

根据 Hitran2004 数据库^[7], 分别选择 CO₂ 和

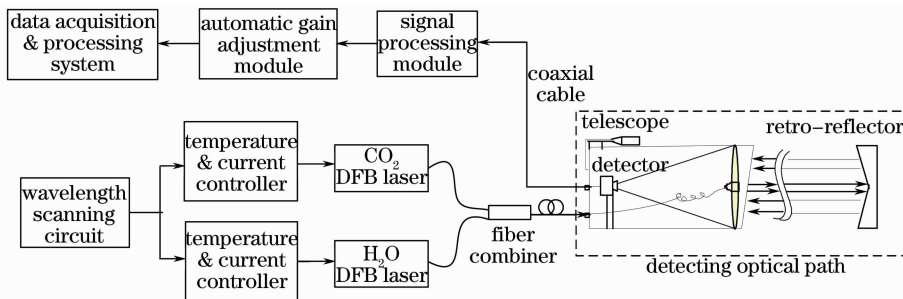


图 1 仪器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of instrument

3 测量原理及方法

3.1 测量原理

TDLAS 技术遵循 Lambert-Beer 吸收定律,激光器发出初始光强为 I_0 、频率为 ν 的单色激光,通过光程长度为 L 的吸收介质后,接收的激光强度为

$$I = I_0 \exp[-S(T)\phi(\nu - \nu_0, T)PcL], \quad (1)$$

式中 ν_0 为气体吸收谱线的中心频率, S 为吸收线强, T 为温度, ϕ 为归一化的吸收线型函数, c 为目标气体的分子数浓度, P 为压力^[8]。通常使用吸光度 $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_\nu$ 表示气体对光的吸收:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_\nu = S(T)\phi(\nu - \nu_0, T)PcL. \quad (2)$$

对(2)式进行全频域积分, $\int_{-\infty}^{+\infty} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)_\nu d\nu$ 为吸收谱线

H₂O 在 1.57 μm 和 1.29 μm 的单根吸收谱线为目标谱线,在相应的光谱范围内没有其他气体的强吸收,适用于高选择性的 CO₂ 和 H₂O 测量。

开放式 CO₂ 和 H₂O 在线检测仪原理图如图 1 所示,主要由激光器及控制模块、信号处理模块、自动增益调节模块、数据采集处理系统和开放检测光路组成。使用 NEL 公司的分布反馈激光器(DFB)作为光源,通过 LIGHTWAVE 的电流控制器和温度控制器调谐激光输出。波长扫描电路产生两路高频锯齿信号,分别叠加在两个电流控制器上,实现波长分时扫描。两路激光经过光纤合束器后接入开放检测光路,收发望远镜准直激光输出到角反射镜后沿原光路反射,通过菲涅耳透镜会聚到 InGaAs 探测器,此时的探测信号包含了 CO₂ 和 H₂O 吸收信息。探测信号接入信号处理模块进行放大滤波,再经过自动增益调节模块后接入数据采集处理系统完成信号采集处理和气体浓度反演。开放检测光路主要由收发望远镜、角反射镜和传输光纤组成。

的积分面积,即积分吸光度 A , 通过 Hitran 数据库可以获得线强 $S(T)$, 在 P, L 已知的情况下,气体浓度 c 表示为

$$c = \frac{A}{S(T)PL}. \quad (3)$$

TDLAS 直接吸收光谱技术无需定标,获得积分吸光度即可反演目标气体浓度。

3.2 自动增益调节方法

自动增益调节电路主要由模拟乘法器、同相放大电路和反馈回路组成,设计原理图如图 2 所示^[9]。反馈回路包括快速半波整流电路,低通滤波电路和差分放大电路。模拟乘法器输出信号表示为

$$V_{01} = k \cdot V_i \cdot V_{04}, \quad (4)$$

式中 V_i 是经过放大滤波后的输出信号, V_{04} 通过反馈环获得, k 是乘法因子, 不随信号的幅度和频率变化。

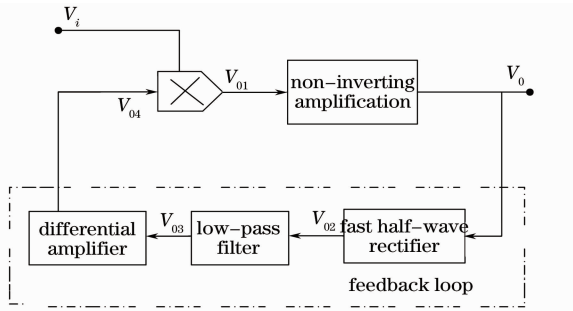


图2 自动增益调节电路的设计原理图

Fig. 2 Design schematic diagram of automatic gain adjustment circuit

同相放大电路由运算放大器和电阻组成, k_1 为放大系数, 由选择的电阻值得到。输出电压表示为

$$V_0 = k_1 \cdot V_{01}. \quad (5)$$

输出信号接入快速半波整流电路, 整流后的信号表示为

$$V_{02} = \begin{cases} 0, & V_0 > 0 \\ -V_0, & V_0 < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

通过差分放大电路输出信号表示为

$$V_{04} = k_2 \cdot (V_{\text{ref}} - V_{03}), \quad (7)$$

式中 V_{03} 为通过低通滤波器输出的正比于 V_0 的直流信号。 V_{ref} 为参考电压, k_2 为放大系数, 由选择的电阻值得到。则输出电压 V_0 表示为

$$V_0 = k \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot (V_{\text{ref}} - V_{03}) \cdot V_i. \quad (8)$$

当开放检测的环境能见度好时, 光电探测器探

测到的信号放大, V_{03} 增大, 则输出信号减小; 而当环境能见度不好时, 光电探测器探测到的信号幅度很小, 输出信号振幅自动增强。由此调整输出信号幅度满足 A/D 采集的需要, 在不影响探测信号信噪比的情况下, 实现连续有效的信号检测, 从而得到有效的浓度测量结果。

3.3 浓度反演方法

对 CO₂ 和 H₂O 进行浓度反演, 方法如下:

1) 对自动增益调节后的信号进行数据采集和处理, 此时的 CO₂ 和 H₂O 吸收信号叠加在斜坡背景上, 为消除颗粒散射、大气湍流等因素造成的光强波动对测量的影响, 采用二次多项式拟合背景基线 $I_0(\nu)$ 并扣除, 得到气体吸光度信号;

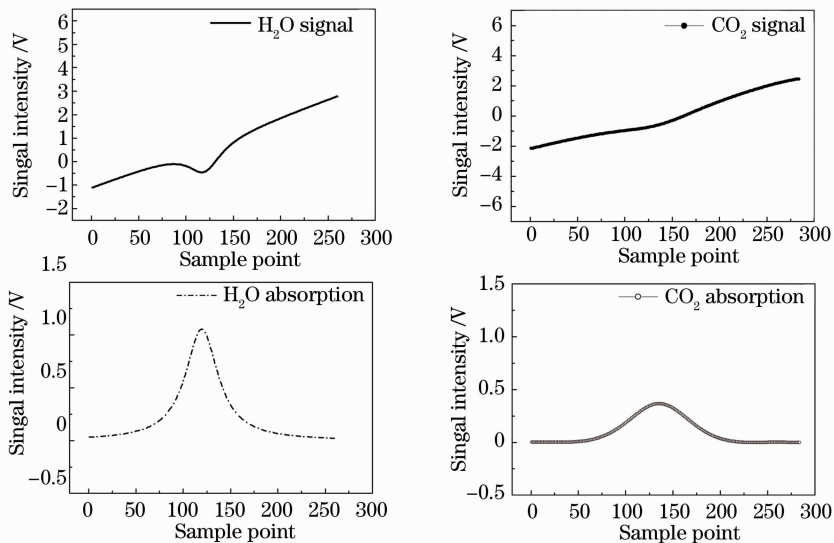
2) 吸光度信号的峰值对应气体吸收谱线的中心频率, 结合波长计测定吸收谱线的扫描频率范围, 将采样点转化为对应激光频率;

3) 对吸光度信号进行洛伦兹线型拟合, 减小开放环境和系统噪声引起的波形形变;

4) 对于 CO₂ 和 H₂O 气体吸收, 在中心频率外 4 倍线宽处, 吸收线形值降至近似为 0, 选择在这段频率范围内计算积分吸光度 A ;

5) 选择 CO₂ 和 H₂O 的吸收线, 在常温下线强分别为 1.138×10^{-23} 和 1.392×10^{-24} , 代入(3)式反演出气体浓度。

实测的 CO₂ 和 H₂O 吸收信号如图 3 所示。

图3 CO₂ 和 H₂O 吸收信号Fig. 3 Absorption signals of CO₂ and H₂O

4 实验及结果

利用 TDLAS 检测仪在中国科学院禹城综合试

验站进行了外场实验, 监测区域有均一的下垫面。光学望远镜装于高度约为 20 m 的实验楼顶上, 角

反射镜安装在开放检测光路另一端的支架上,单程监测光程约 1238 m,仪器安装如图 4 所示。与同一光路架设的涡度相关系统中的 LI-7500 进行测量数据的对比分析。



图 4 仪器安装图

Fig. 4 Diagram of instrument installation

TDLAS 检测仪采用了 2 kHz 扫描频率,减弱了大尺度监测时湍流波动对扫描吸收光谱的影响,提高了测量信号的稳定性^[10],实现了高时间分辨率的气体检测。由于在测量夜间出现了大雾导致探测信号过小,或白天探测信号过强超出 A/D 采集的范围,未采用自动增益调节时反演产生了无效数据,部分测量结果如图 5 所示。

围,未采用自动增益调节时反演产生了无效数据,部分测量结果如图 5 所示。

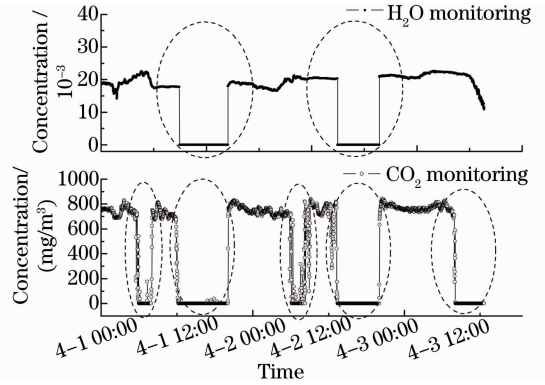


图 5 部分测量结果

Fig. 5 Part of the measurement results

使用自动增益调节后连续测量了 17 d, TDLAS 检测仪和 LI-7500 连续监测结果如图 6 所示。如图 7 所示,对数据进行相关性分析,线性相关系数分别为 95.6% 和 73.2%,浓度趋势的一致性良好。由 CO₂ 监测结果可以看出,其浓度日变化趋势明显,呈白天低,夜间高的规律。

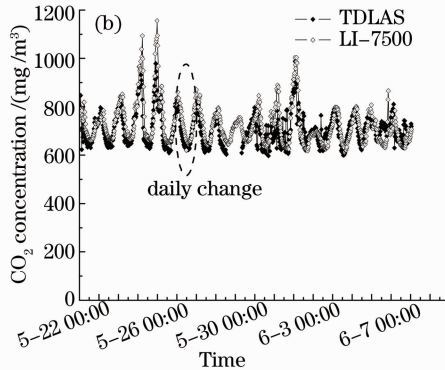
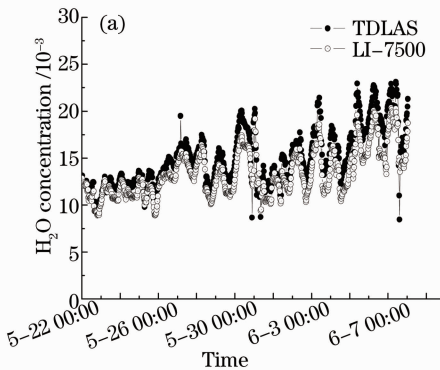


图 6 自动增益调节后的现场实验结果。(a) H₂O; (b) CO₂

Fig. 6 Field experimental results after automatic gain adjustment. (a) H₂O; (b) CO₂

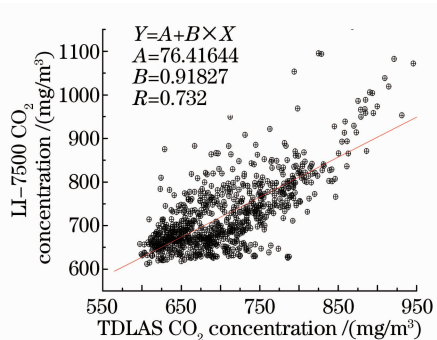
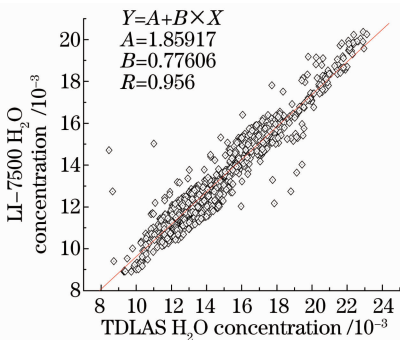


图 7 线性拟合结果

Fig. 7 Linear fitting results

分析涡度相关测量和 TDLAS 测量结果差异的原因:两者测量方式不同,前者利用点式测量,用于

反演局地通量,不能全面反映大尺度区域浓度变化情况;后者得到开放式大尺度监测光程下的气体平

均浓度,与天气、温度等众多因素有关,这是造成浓度差异的主要原因^[11]。TDLAS 检测仪在测量过程中具有长期稳定性,没有出现信号采集失真和大幅跳变的情况,验证了自动增益调节的有效性。

5 结 论

1) 基于 TDLAS 的开放式 CO₂ 和 H₂O 在线检测结合了波长快速扫描、直接吸收检测技术,具有高灵敏、非接触、快速响应的特点,满足大尺度区域监测 CO₂ 和 H₂O 浓度的要求。

2) 通过对信号自动增益调节的控制,减小了大气能见度等因素对信号 A/D 采集的影响,避免了连续监测过程中的信号采集失真,减小了浓度反演误差。

3) 在禹城综合试验站进行外场实验,TDLAS 检测仪和 LI-7500 的测量数据一致性好,验证了本检测技术用于气体浓度检测的稳定性和准确性。监测点 CO₂ 浓度具有白天低,夜间高的日变化规律。

4) 进一步结合 TDLAS 检测仪 20 Hz 的数据和涡动相关数据可以计算出气体通量,为监测开放大气中的碳通量和水汽通量提供新方法。

参 考 文 献

- 1 Ramanathan V, Cicerone R J, Singh H B, *et al.*. Trace gas trends and their potential role in climate change[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(D3): 5547—5566.
- 2 Li Jing, Liu Shuhua, Mao Yuhao, *et al.*. Characteristics of CO₂ flux and concentration in different ecosystems [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1298—1307.

- 李 婧, 刘树华, 茅宇豪, 等. 不同生态系统 CO₂ 通量和浓度特征分析研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1298—1307.
- 3 Chen Jiuying, Liu Jianguo, He Yabai, *et al.*. Scanning frequency optimization of laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0230003.
- 陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 等. 激光吸收光谱技术中扫描频率的选择[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0230003.
- 4 Liming Wang, Yujun Zhang, Hongbin Li, *et al.*. Study on long distance transmission technique of weak photocurrent signal in laser gas sensor[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(4): 042802.
- 5 Wang Xiaomei, Zhang Yujun, Liu Jianguo, *et al.*. Applications of a tunable diode laser absorption spectrometer in monitoring greenhouse gases[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(6): 363—365.
- 6 Le Barbu T, Vinogradov I, Durry G, *et al.*. TDLAS a laser diode sensor for the in situ monitoring of H₂O, CO₂ and their isotopes in the Martian atmosphere [J]. *Advances in Space Research*, 2006, 38(4): 718—725.
- 7 Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, *et al.*. The Hitran 2004 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 96(2): 139—204.
- 8 Allen M G Meas. Diode laser absorption sensors for gas dynamic and combustion flows[J]. *Meas Sci Technol*, 1998, 9(4): 545—562.
- 9 You Kun, Zhang Yujun, Wang Liming, *et al.*. Improving the stability of tunable diode laser sensor for natural gas leakage monitoring[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 760-762: 84—87.
- 10 Wang Liming, Zhang Yujun, Li Hongbin, *et al.*. Effect of turbulence on laser absorption signal and its improvement method [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 670—674.
- 王立明, 张玉钧, 李宏斌, 等. 湍流对激光吸收光谱信号的影响及改善方法研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(5): 670—674.
- 11 Tian Yongzhi, Liu Jianguo, Zeng Zongyong, *et al.*. A new optical method for the determination of heat and gas fluxes measurement in the surface laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0801001.
- 田勇志, 刘建国, 曾宗泳, 等. 近地面层热通量和气体通量光学监测新方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0801001.

栏目编辑:李志兰