

## 大尺度区域水汽浓度激光检测方法的研究

何莹<sup>1</sup>, 张玉钧<sup>1</sup>, 王立明<sup>1</sup>, 尤坤<sup>1</sup>, 周毅<sup>1</sup>, 孙晓敏<sup>2</sup>, 刘振民<sup>2</sup>

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

**摘要** 为了实现大尺度区域下大气中水汽浓度的高灵敏度、高精确性、快速响应检测, 与遥感反演的数据进行校正, 采用了 TDLAS 直接吸收技术结合开放式监测的方法。选择水汽分子在 1.27 μm 附近的单根吸收谱线为目标谱线, 设计了大尺度区域水汽激光检测系统。结合多次反射池验证了系统性能, 40 m 光程下极限灵敏度为 14.803 mmol·mol<sup>-1</sup>。利用本系统在中国科学院禹城综合试验站完成了 1 420 m 光程下的连续外场实验, 系统工作稳定, 并与同场地涡度相关观测系统中的气体分析仪 LI-7500 的测量数据进行了对比, 数据一致性较好。为在复杂野外非均匀下垫面的水汽浓度变化的监测提供新方法。

**关键词** 激光吸收光谱; 开放光路; 水汽; 大尺度区域

**中图分类号:** O443.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)03-0608-05

### 引言

水汽是大气中重要的气象参数, 在地球的辐射平衡中起到重要作用。水汽的分布、传输和季节变化对于研究水循环、全球气候变化等方面具有重要意义。在山区、沙漠、冰川等地形复杂的地区, 相对于传统检测方法, 利用遥感手段反演水汽浓度具有很大优势<sup>[1, 2]</sup>, 可以分析大区域范围内水汽时空分布的变化趋势。然而, 水汽的遥感数据仍然需要与地基测量数据进行对比和校正。

光谱技术<sup>[3]</sup>是目前开展水汽探测的有效手段之一, 国内外学者先后提出了多种水汽的光谱探测技术, 包括积分腔输出光谱(ICOS)技术<sup>[4]</sup>, 中红外差频检测技术<sup>[5]</sup>, 激光雷达技术<sup>[6]</sup>, 可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)<sup>[7, 8]</sup>等。其中, TDLAS 技术结合开放式监测可以对大尺度区域下大气中的水汽浓度进行高灵敏度、高精确性、快速非采样检测, 并不受采样地点、局部通量、风速大小等因素的限制。

以水汽分子在 1.27 μm 附近的单根特征吸收谱线为目标谱线, 自主研发了 TDLAS 激光检测系统进行水汽含量的检测方法研究, 结合多次反射池验证了系统性能。利用本系统在中科院禹城综合试验站完成了大尺度区域下的连续外场实验, 并与同场地涡度相关观测系统中的气体分析仪 LI-7500 测量数据进行了对比分析。

### 1 原理

红外激光吸收光谱检测遵循 Lambert-Beer 定律: 强度为  $I_0$ , 频率为  $\nu$  的单色激光, 通过长度为  $L$  的吸收介质后, 在接收端测得的透射光强为  $I$

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

式中,  $\nu_0$  为气体吸收线的中心频率,  $S$  为吸收线强,  $\phi$  为归一化的吸收线型函数,  $c$  为目标吸收气体占总气体的体积比(浓度),  $P$  为压力,  $L$  为吸收光程<sup>[9]</sup>。

设  $T$  为吸光度, 一般表示气体对光的吸收, 则有

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

式中, 结合背景基线拟合算法、吸收线型拟合算法和检测光强归一化可以准确获得积分吸光度  $T$ , 通过 Hitran 数据库获得线强  $S$ , 在  $P$  和  $L$  已知的情况下, 计算出气体浓度  $c$ , 如式(3)所示。

$$c = \frac{T}{S(T)\phi(\nu - \nu_0, T)PL} \quad (3)$$

TDLAS 直接吸收光谱技术无需定标, 可以根据 Hitran 数据库直接反演目标气体浓度, 解决了大气中水汽不易进行标定的问题。直接吸收光谱技术有两种工作方式: 一是将激光器的输出波长固定在目标气体吸收线的中心; 另外一种

收稿日期: 2012-07-19, 修订日期: 2012-10-30

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)和中国科学院合肥物质科学研究院青年人才基金项目(Y03RC21122)资助

作者简介: 何莹, 女, 1983年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所助理研究员 e-mail: heyings@aiofm.ac.cn

激光的波长扫描通过目标气体整根吸收线，并通过信号平均得到一条谱线。本系统采用第二种方式，可以测量整根水汽吸收谱线，得到其具体特征<sup>[9]</sup>。

## 2 系统设计

根据 Hitran2004<sup>[10]</sup> 数据库，水汽分子在 1.27 μm 附近的吸收线如图 1 所示。水汽在 1 279.3 nm 吸收线线强为 10<sup>-24</sup> 量级，与两侧的吸收线间隔较大，在本光谱范围内大气中没有其他气体的强吸收，因此选择该吸收线进行水汽测量。

TDLAS 激光检测系统结构如图 2 所示。使用 NEL 公司的 DFB 激光器作为光源，通过 LIGHTWAVE 公司的电流控制器和温度控制器调谐激光输出中心波长为 1 279.3 nm，并实现激光输出功率的调节。波长高频扫描电路产生高频锯齿信号，叠加在电流控制器上实现激光波长快速扫描。激光通过光纤准直器进入开放检测光路，光路中包含水汽吸收信息的信号由 InGaAs 探测器接收，再通过同轴电缆接入阿尔泰数据采集卡 PCI8025，由工控机的信号处理系统完成水汽吸光度的提取和浓度反演。本系统实现 10 Hz 的高时间分辨率水汽检

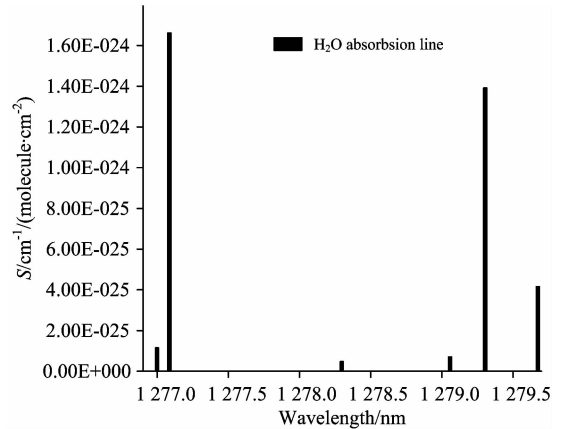


Fig. 1 Absorption line of H<sub>2</sub>O

开放检测光路主要包括光学收发望远镜、角反射镜和传输光纤等，如图 2 中虚线框所示。激光通过望远镜前端的菲涅尔透镜中心输出，到达角反射镜后按原光路反射，反射光由菲涅尔透镜汇聚并由探测器接收。利用开放光路进行检测，不需气体采样，不受复杂地形的限制，可以进行大范围动态监测。

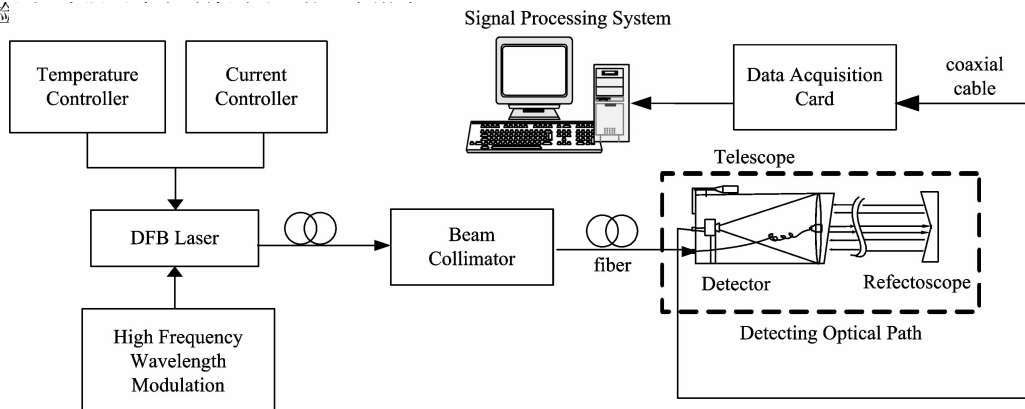


Fig. 2 System schematic diagram

## 3 系统性能分析

在 TDLAS 系统检测光路上放置一个总光程约 40 m 的多次反射池，替换开放光路，在相对稳定的环境下进行系统性能分析。使用露点发生仪 LI-610 产生水汽，从 LI-610 输出口流出的水汽连接进入多次反射池入口，再将多次反射池出口连接到 LI-610 的气体输入口，使多次反射池和露点发生仪形成闭环连接。利用 LI-610 产生水汽浓度和 TDLAS 系统的测量浓度进行比对分析。

由 LI-610 手册，已知空气的温度  $t$  (°C) 和露点温度  $t_d$  (°C) 时，用下式求出实际水汽压  $e$  (hPa) 和饱和水汽压  $e_{sat}$  (hPa)。

$$e = 6.112 \exp\left(\frac{17.67t_d}{t_d + 243.5}\right) \quad (4)$$

$$e_{sat} = 6.1365 \exp\left(\frac{17.5t}{t + 240.97}\right) \quad (5)$$

空气的相对湿度 RH(%) 为

$$RH = 100e/e_{sat} \quad (6)$$

在气压  $P$  (hPa) 已知的情况下，空气的水汽摩尔比湿  $r$  即水汽体积比浓度 ( $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 为

$$r = 1000 \times e/P \quad (7)$$

Table 1 H<sub>2</sub>O concentration measured by LI-610

$t_d$ /°C	$P$ /hPa	$e$ /hPa	concentration/( $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
11	1 011	13.118	12.975
12	1 011	14.015	13.863
13	1 011	14.966	14.803
14	1 011	15.974	15.800
15	1 012	17.040	16.838
16	1 011	18.169	17.971
17	1 011	19.363	19.152
18	1 011	20.626	20.401

实验当天室内气温为 22.6 °C 左右, 进行 11~18 °C 的均匀升温实验。结合当天的气象条件, 计算出 LI-610 在不同时刻产生的水汽值, 如表 1 所示。

TDLAS 系统同时对水汽进行实时连续检测, 测量原始信号如图 3 实线所示, 结合背景基线拟合算法、吸收线型拟合和检测光强归一化得到的直接吸收信号如图 3 虚线所示。

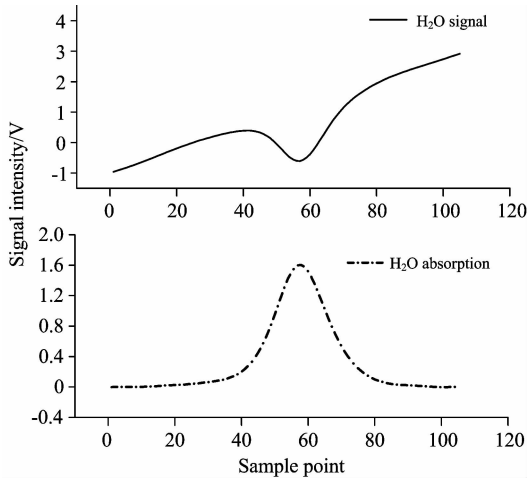


Fig. 3 Absorption signal of H<sub>2</sub>O

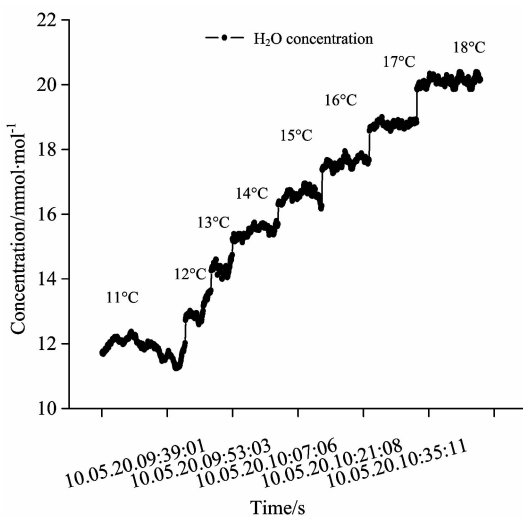


Fig. 4 H<sub>2</sub>O concentration measured by TDLAS system

Table 2 Comparison of concentration results

$t_d$ /°C	Concentration by LI-610 /(mmol · mol <sup>-1</sup> )	Average concentration by measured TDLAS system/(mmol · mol <sup>-1</sup> )	Relative error/%
11	12.975	12.040	7.206
12	13.863	13.022	6.067
13	14.803	14.334	3.168
14	15.800	15.476	2.051
15	16.838	16.562	1.639
16	17.971	17.610	2.009
17	19.152	18.772	1.984
18	20.401	20.116	1.397

根据式(3), TDLAS 系统可以实现水汽浓度精确反演, 不同露点下对应的监测结果如图 4 所示。取相同露点下, TDLAS 系统测量均值与 LI-610 结果做比较, 如表 2 所示。

多次反射池的镜片在充入水汽后需要一段时间稳定。从表 2 可以看出在 13 °C 以下两者数据间的偏差较大。影响 TDLAS 系统测量的可能原因如下:

(1) 接近 40 m 光程下多次反射池测量的检测限;

(2) 多次反射池镜片受到低温产生水汽的影响, 降低了测量准确性。

在 40 m 光程下 TDLAS 系统可以准确测量 14.803 mmol · mol<sup>-1</sup> 水汽浓度, 作为此光程下的极限灵敏度。选择 13~18 °C 的水汽浓度进行线性拟合, 线性拟合度高于 99.6%, 具有很好的相关性, 如图 5 所示。本系统工作稳定情况下, 与 LI-610 测量相对误差小于 4%, 准确性高。

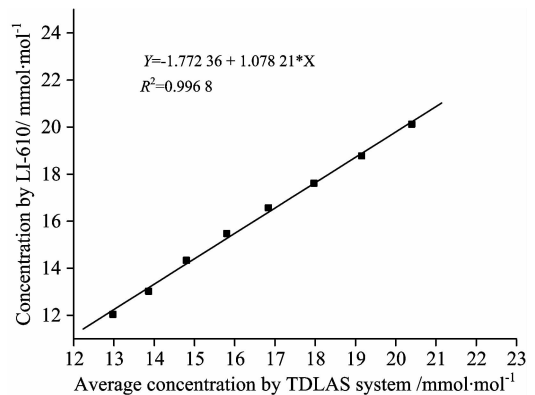


Fig. 5 Linear fitting result

## 4 外场实验分析

外场实验地点选择在中国科学院禹城综合试验站, 监测区域通风情况良好, 构成较均一的下垫面。在试验站南北向安装了一套 TDLAS 激光检测系统, 光学收发望远镜装于高度约为 20 m 的实验楼顶上, 角反射镜放置在开放监测光路另一端的安装固定支架上, 单程监测光程约为 1 420 m。在同一区域的田间架设有台涡动相关观测系统的气体分析仪 LI-7500, 用于同期测量数据的对比, 以进一步验证 TDLAS 系统的测量性能<sup>[11, 12]</sup>。

测量周期为 13 d, TDLAS 系统和 LI-7500 连续监测结果如图 6(a)所示, 前者测量数据总体高于后者。根据数据记录剔除测量中的奇异值, 进行浓度数据相关性分析, 两者线性拟合度达到 78% 以上, 测量趋势吻合, 如图 6(b)所示。

结果分析: 由于两者测量方式不同, TDLAS 系统是长距离测量气体平均浓度, 与大范围天气、温度、能见度等众多因素有关; 而 LI-7500 是利用涡动相关点式测量方式, 用于反演局地通量, 不能全面的反应大尺度区域的水汽浓度变化情况。此外, LI-7500 的安装高度低于 TDLAS 系统, 在浓度测量上引入一定差异。外场实验总体验证了 TDLAS 系统工作的稳定性和大尺度测量的优势。

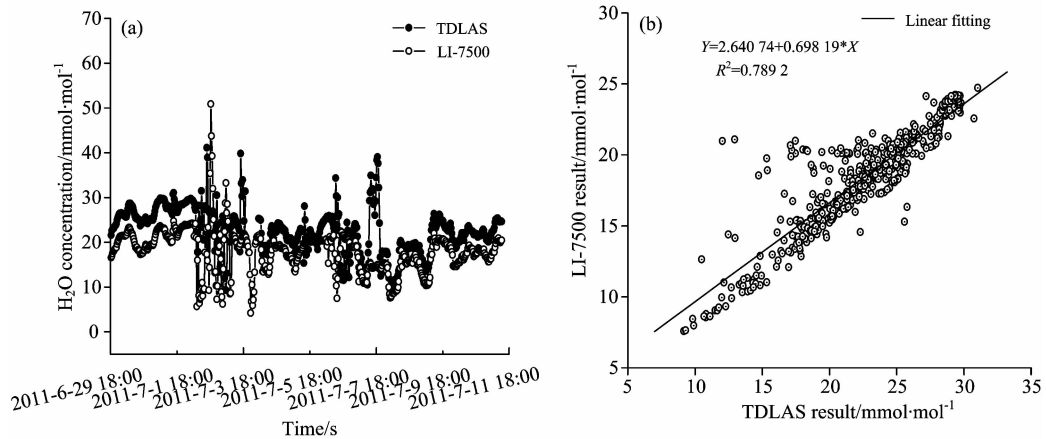


Fig. 6 (a) The field experimental results; (b) Comparative analysis result

## 5 结论

(1) TDLAS 激光检测系统结合直接吸收技术、波长快速扫描和开放式光路, 不需气体采样、监测范围广、响应时间短, 满足大尺度区域下测量水汽浓度的要求。

(2) 结合多次反射池验证了 TDLAS 系统性能, 40 m 光程下系统极限灵敏度为  $14.803 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 系统工作稳

定时与露点仪 LI-610 水汽发生值的相对误差小于 4%。

(3) 通过禹城综合试验站的外场实验分析, TDLAS 系统和 LI-7500 测量的数据一致性较好, 前者测量数据总体高于后者, 验证了系统的工作稳定性。

(4) 进一步, 结合涡动相关数据可以计算出水汽通量。为在复杂野外非均匀下垫面进行水汽浓度和通量监测提供新方法。

## References

- [1] Gao B C, Geotz A F H. Journal of Geophysical Res., 1990, 95: 3549.
- [2] WANG Wei-min, SUN Xiao-min, ZHANG Ren-hua, et al(王伟民, 孙晓敏, 张仁华, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2005, 9(1): 8.
- [3] GENG Xiang, CHEN Bin, ZHU Wen-jing, et al(耿响, 陈斌, 朱文静, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(12): 3551.
- [4] TAN Zhong-qi, LONG Xing-wu, HUANG Yun, et al(谭中奇, 龙兴武, 黄云, 等). Chinese Lasers(中国激光), 2008, 35(10): 1563.
- [5] Chen W, Przygozki C, Delbarre H, et al. Infrared Physics & Technology, 1998, 39(6): 415.
- [6] XIE Chen-bo, ZHOU Jun, YUE Gu-ming, et al(谢晨波, 周军, 岳古明, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2007, 36(3): 365.
- [7] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Chinese Optics Letters, 2006, 4(2): 116.
- [8] Barbu T Le, Vinogradov I, Durry G, et al. Advances in Space Research, 2006, 38: 718.
- [9] Allen M G. Meas. Sci. Technol., 1998, 9(4): 545.
- [10] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, et al. Journal of Quantitative Spectrosc. Radiat. Transfer., 2005, 96(2): 139.
- [11] Sun L, Shen B Z, Sui B. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(6): 1399.
- [12] LIU Hui-zhi, TU Gang, DONG Wen-jie, et al(刘辉志, 涂钢, 董文杰, 等). Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学), 2006, 30(1): 108.

## Study on Large-Scale Regional Laser Detection Methods for Water Vapor Concentration

HE Ying<sup>1</sup>, ZHANG Yu-jun<sup>1</sup>, WANG Li-ming<sup>1</sup>, YOU Kun<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>, SUN Xiao-min<sup>2</sup>, LIU Zhen-min<sup>2</sup>

1. Key Lab of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. Key Lab of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** Water vapor is an important meteorological parameter in the atmosphere, TDLAS direct absorption technology combined with open-path monitoring was used in order to achieve large-scale regional atmospheric water vapor concentration detection with high sensitivity, high accuracy and fast response, and to correct the remote sensing data. The large-scale regional laser detection system for water vapor was designed and the absorption line of water vapor molecules near  $1.27 \mu\text{m}$  was chosen as the goal line. The system performance was verified in conjunction with a multiple reflection cell, that the system limit sensitivity was  $14.803 \text{ mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$  in optical path of 40 m. The continuous field experiment in 1 420 m optical path at the Yucheng Integrated Experimental Station, CAS was completed with this system which worked stably. Then the measured data was compared with the data of a gas analyzer LI-7500 in eddy correlation observation system at the same site, and the data consistency was good. A new method for water vapor concentration monitoring in the complex field of non-uniform underlying surface was provided.

**Keywords** Laser absorption spectroscopy; Open-path;  $\text{H}_2\text{O}$ ; Large-scale region

(Received Jul. 19, 2012; accepted Oct. 30, 2012)