

拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布

于海利^{1,2} 胡顺星¹ 吴晓庆¹ 曹开法^{1,2} 孟祥谦^{1,2} 苑克娥¹ 黄 见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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 介绍了中国科学院安徽光学精密机械研究所研制成功的我国第一台测量低对流层大气 CO₂ 时空分布的拉曼激光雷达系统, 选用波长 355 nm 的紫外激光作为光源, 利用光子计数卡双通道采集大气中 N₂ 和 CO₂ 的拉曼后向散射信号。详细分析了拉曼激光雷达系统的定标方法, 提出采用 Li7500 型 H₂O/CO₂ 分析仪与拉曼激光雷达系统进行对比与标定, 结果显示激光雷达与 CO₂ 分析仪数据变化趋势一致性较好, 激光雷达具有很高的探测灵敏度与准确性, 通过线性拟合水平方向标定误差小于 0.2%, 垂直方向小于 1.4%。由标定关系反演出大气中 CO₂ 的时空分布, 给出了合肥西郊低对流层大气 CO₂ 水平方向 0~2.0 km 与垂直方向 0~2.5 km 分布的典型测量结果。

关键词 大气光学; 拉曼激光雷达; CO₂ 分布廓线; 系统标定; 低对流层

中图分类号 TN958.96

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0801003

Measurement of CO₂ Concentration Profiles of Lower-Troposphere with Raman Lidar

Yu Haili^{1,2} Hu Shunxing¹ Wu Xiaoqing¹ Cao Kaifa^{1,2} Meng Xiangqian^{1,2} Yuan Ke'e¹
Huang Jian¹ 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, Anhui 230031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A prototype of Raman lidar first developed by Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, for monitoring lower-tropospheric CO₂ profiles in China is introduced. An ultraviolet laser with wavelength at 355 nm is selected as light source and a photon-counting card is used to acquire atmospheric N₂ and CO₂ Raman backscattering signals. Methods of the Raman lidar system calibration are analyzed in detail and Li7500 H₂O/CO₂ analyzer is employed to contrast with our lidar. The results show good agreement in the trend of changing and verifying high detection sensitivity and accuracy of the lidar system. By linear fitting, the calibration error is smaller than 0.2% and 1.5% in horizontal and vertical direction, respectively. Then profiles of atmospheric CO₂ can be calculated in accordance with calibration equations and typical measurement results in the western suburbs of Hefei are given. The detection range can reach 2.0 km and 2.5 km in horizontal and vertical direction, respectively.

Key words atmospheric optics; Raman lidar; CO₂ concentration profile; lidar system calibration; lower-troposphere

OCIS codes 010.3640; 010.1280; 010.1290; 010.0280

1 引 言

CO₂ 是大气中除水汽外含量最高的一种温室气体, 近几十年来由于人类活动的加剧导致大气中 CO₂ 的含量迅速上升。美国国家大气海洋总署地球系统

体, 近几十年来由于人类活动的加剧导致大气中 CO₂ 的含量迅速上升。美国国家大气海洋总署地球系统

收稿日期: 2011-12-28; 收到修改稿日期: 2012-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(41005015)、科技部基础性工作专项(2007FY110700)和中科院知识创新方向性项目(KJ CX2-EW-N07)资助课题。

作者简介: 于海利(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达探测技术方面的研究。E-mail: yhlcas@yahoo.com.cn

导师简介: 胡顺星(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事各种激光雷达大气探测方法、技术研究和利用激光雷达对大气成分参数的长期观测等方面的研究。E-mail: sxhu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

研究实验室(NOAA/ESRL)公布的数据^[1]表明,全球CO₂的体积混合比已由1980年的 3.39×10^{-4} 增加到2010年的 3.89×10^{-4} ,30年的时间内增加了近 5×10^{-5} ,并且每年仍在以 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 的速率递增。大气中CO₂的含量不断增加,对地气辐射平衡、气候变化产生了重大影响^[2]。但是目前人们对于大气中CO₂的分布规律、CO₂的源与汇的认识仍然不够,特别是对大气CO₂在垂直方向的分布研究很少^[3]。而近地面的大气信息与人类的活动关系最为密切,因此,准确地测量低对流层CO₂的体积混合比对于量化CO₂对气候变化的影响、研究CO₂的排放策略以及进一步对加深全球碳循环中源与汇的认识意义重大。

激光雷达具有很好的时空分辨率,是大气研究与环境监测的有力工具^[4,5]。利用激光雷达测量大气CO₂分布主要有差分吸收技术与拉曼(Raman)散射技术。基于差分吸收测量(DIAL)原理的激光雷达系统虽然测量精度较高,但受限于激光光源,需要单纵模、严格的窄线宽(达MHz)、高的脉冲能量以及好的光束质量^[6],使得系统复杂,技术难度大。Raman激光雷达,利用气体的受激Raman散射效应来检测大气中微量气体的分布规律,具有技术方案相对简单、价格低廉等优势,在环境监测领域有着广阔的应用前景^[7]。2004年美国NASA的Whiteman博士^[8]负责的Raman激光雷达探测CO₂项目,通过数值模拟与实际测量论证了Raman激光雷达可以实现对低对流层CO₂的精确测量。目前,国内只有中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了Raman激光雷达测量大气CO₂的相关实验研究^[9-11],并于2010年12月研制成功我国第一台具有自主知识产权的大气CO₂激光雷达监测系统ARL-1(Atmospheric Raman Lidar-1)。本文介绍了ARL-1 Raman激光雷达系统以及探测大气中CO₂气体的基本原理,并利用其对合肥西郊大气CO₂进行了测量。要反演大气CO₂的分布廓线,对Raman激光雷达系统的标定十分关键,本文详细分析了Raman激光雷达系统定标的方法,并结合Li7500型H₂O/CO₂分析仪对激光雷达系统进行了标定,反演出低对流层大气中CO₂的混合比分布,给出了典型的测量结果。

2 Raman激光雷达系统及其标定

2.1 实验系统

ARL-1激光雷达系统主要由激光发射单元、光

学接收单元、信号探测与采集单元以及控制单元4部分组成,其系统结构框图如图1所示。发射单元采用法国Quantel公司的Brilliant B型Nd:YAG激光器输出基频1064 nm的激光,经国产偏硼酸钡(BBO)三倍频晶体产生354.7 nm紫外光作为光源,单脉冲输出能量为50 mJ,重复频率为20 Hz。光束经过两个镀有354.7 nm高反铝膜的45°反射镜M1、M2后实现光路转向,再经扩束镜进行光束整形,最后经由45°全反镜和三维空间扫描系统发射到大气中。

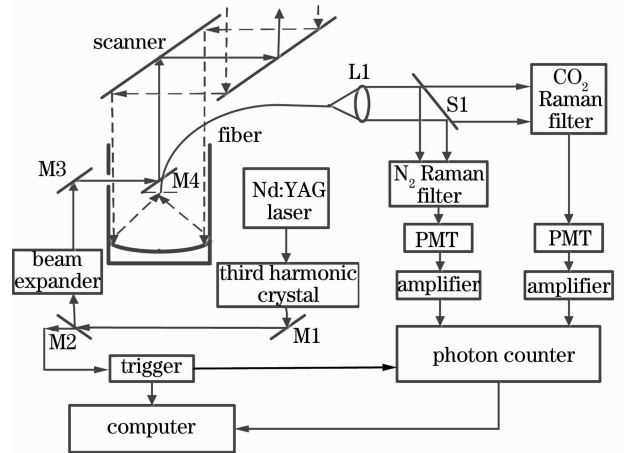


图1 二氧化碳 Raman 激光雷达结构图

Fig. 1 Configuration of ARL-1 Raman lidar system for CO₂ measurements

激光与大气分子作用后,产生的后向散射信号进入光学接收单元。光学接收单元主要包括接收望远镜和后继光学单元,回波信号经望远镜接收汇聚,再经光纤耦合传输到后继光学接收单元,后向散射光信号先经准直器,再由窄带滤光片对天空背景信号以及噪声信号进一步抑制,然后将回波光信号进行分束,分别进入CO₂和N₂通道进行双通道信号采集。信号探测与采集单元包括9214QB型光电倍增管(PMT)、Phillips 6954前置放大器和MCA-3/P7882光子计数卡。通过设置光子计数卡的采样频率以及电子放大系统的响应时间,实现激光雷达的空间分辨率为30 m。Raman激光雷达的控制单元主要包括:激光器制冷单元、同步信号触发器、光电倍增管及其配套的制冷器 and 高压电源、光子计数卡的控制软件及控制计算机。其中发射光束在经高反镜M2时的透射光,作为采集系统的同步触发信号。系统各部分组件参数如表1所示。

表1 Raman 激光雷达系统的各组件的技术参数
Table 1 Main specifications of ARL-1 Raman lidar system

Unit	Specification	
Laser transmitter	Laser type	Quantel Brilliant B Nd:YAG
	Wavelength(nm)/pulse repetition(Hz)	354.7/20
	Pulse energy(mJ)/energy fluctuation(%)	50/±3
	Beam divergence(mrad)/pulse width(ns)	0.5/4
	Expander	6X
Scanner	Efficiency diameter(mm)	300
Telescope	Scanning spatial range	360°(horizontal)×90°(vertical)
	Telescope type/ diameter (mm)	Newtonian/300
	Focal length(mm)/field of view(mrad)	1000/0.15
Fiber	Diameter(mm)/numerical aperture/transmittance	1.5/0.22/99.9%
CO ₂ Raman filter	Aperture(mm)/central wavelength(nm)	25.4/371.68
	Band width(nm)/transmittance(%)	0.5/>60
N ₂ Raman filter	Aperture(mm)/central wavelength (nm)	25.4/386.66
	Band width(nm)/transmittance(%)	1.0/>60
	PMT type/quantum efficiency (%)	9214QB/25
Signal detection and data acquisition	Photon counter	MCA-3 P7882
	Preamplifier	Phillips 6954
	Computer	Main frequency 2.5 GHz

2.2 探测原理

在 354.7 nm 入射激光的激励下, Raman 激光雷达 CO₂ 通道 371 nm 与 N₂ 通道 386 nm 接收到的探测距离为 z 处的散射回波信号表达式为^[12]

$$P_{\lambda_C}(z) = \frac{k_C}{z^2} \beta_C(\pi) n_C(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_C, z_0, z), \quad (1)$$

$$P_{\lambda_N}(z) = \frac{k_N}{z^2} \beta_N(\pi) n_N(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_N, z_0, z), \quad (2)$$

式中 $P_{\lambda}(z)$ 为高度为 z 处气体分子的 Raman 后向散射回波信号; λ_0 、 λ_C 、 λ_N 分别为激光发射波长、CO₂ 和 N₂ 的 Raman 散射波长; k 为 Raman 激光雷达中的仪器常数; $\beta(\pi)$ 为气体分子的 Raman 后向散射微分截面; $n(z)$ 为高度为 z 处气体分子的数密度; z_0 为 Raman 激光雷达所在的高度; $q(\lambda, z_0, z) = \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda}(z') dz'\right]$ 称为大气透射率, $\alpha_{\lambda}(z)$ 是波长 λ 时的大气消光系数。

CO₂ 体积混合比 $\omega(z)$ 随高度 z 的分布为

$$\omega(z) = \frac{n_C(z)}{n_{dry}(z)}. \quad (3)$$

由于在低对流层范围内 N₂ 分子数密度与干空气分子数密度的比值 $\frac{n_N(z)}{n_{dry}(z)}$ 相对稳定, 所以可以用 N₂ 的 Raman 后向散射回波信号代替干空气。综合

(1)、(2)式, 大气 CO₂ 的体积混合比可以表示为

$$\omega(z) = \frac{n_C(z)}{n_N(z)} \frac{n_N(z)}{n_{dry}(z)} = C_w \Delta_q^w(z_0, z) \frac{P_{\lambda_C}(z)}{P_{\lambda_N}(z)}, \quad (4)$$

式中 $C_w = \frac{k_N \beta_N(\pi) n_N(z)}{k_C \beta_C(\pi) n_{dry}(z)}$, 称为 Raman 激光雷达探测 CO₂ 混合比的系统标定常数; $\Delta_q^w(z_0, z) = \frac{q(\lambda_N, z_0, z)}{q(\lambda_C, z_0, z)}$, 称为大气透射率修正函数。

由(4)式可以看出, 除透射率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 外, CO₂ 混合比与 CO₂ 和 N₂ 的 Raman 后向散射信号的比值成正比。对于近地面大气, 因 Raman 散射波长 λ_C 与 λ_N 相差不大, 故可以忽略透射率修正函数 $\Delta_q^w(z_0, z)$ 的影响。因此, 通过获得系统标定常数 C_w , 计算 Raman 激光雷达测量的 CO₂ 和 N₂ Raman 后向散射信号的比值就可以获得 CO₂ 混合比 $\omega(z)$ 及空间分布。

2.3 系统标定

为了得到 CO₂ 时空分布, 根据激光雷达方程, Raman 激光雷达系统存在一个系统常数 C_w 需要标定。系统常数的标定具有重要意义, 一方面该常数的精确确定对于激光雷达精确反演大气参量具有直接的影响, 系统常数的改变将会直接引起测量污染物含量反演的变化。另一方面, 激光雷达系统常数的稳定性也是衡量激光雷达性能是否稳定的一个重要指标。从原理上讲 Raman 激光雷达的系统常数

可以通过绝对定标的方法确定出来,只需对系统常数表达式中的各个参数进行确定即可,这种方法称为绝对定标。但是绝对定标方法中 CO_2 与 N_2 的后向散射微分截面 $\beta_c(\pi)$ 与 $\beta_N(\pi)$ 难以准确确定,并且激光雷达系统的仪器常数受到仪器测量精度、元器件透射率、系统的老化以及环境温度变化等诸多因素的影响,在实际操作上有比较大的困难^[13]。因此实际操作中常常采用与其他仪器对比然后确定系统常数的相对定标方法,如大气模式定标、无线电探空仪定标、卫星数据定标、火箭探空资料定标和单点仪器定标等方法。大气模式定标所用到的对比资料来源于当地长期累计的气象探空资料,如测温激光雷达在进行定标过程中就可以采用本地多年来积累的温度数据或者大气温度模式开展激光雷达系统的定标^[14]。对于测量大气 CO_2 的 Raman 激光雷达, CO_2 的含量相对来讲比较稳定,因此可以利用大气模式对 Raman 激光雷达系统进行标定,但是因为大气的参数受多方面因素影响,利用模式定标会引入较大的误差,实时测量时的数据与模式会有一些的差别,因此这种定标方法的精度难以保证。无线电探空仪定标常用于大气温度、水汽的定标,对 CO_2 的测量尚未见报道。卫星定标是利用卫星数据与激光雷达数据对比,需要考虑卫星轨道的运转周期,只有当卫星运转到与激光雷达探测所在地重合时才能开展对比实验,因此局限性很大。单点仪器定标是将探测仪器放置在激光雷达发射光路上,将仪器采集的数据与激光雷达数据进行对比。实验中采用放置在同一地点 30 m 高度处气象塔上的 Li7500 型 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 分析仪^[15] 同步进行观测,以实现系统的定标。Li7500 型 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 分析仪(以下简称 CO_2

分析仪)由微机控制,采用非分散红外相关(NDIR)光学测量技术,测量精度达 1.1×10^{-7} ,可精确、稳定地测量大气 CO_2 浓度。

2010 年 12 月 6 日与 8 日天空晴朗无云,本课题组利用 ARL-1 Raman 激光雷达对合肥西郊水平与垂直方向的 CO_2 分布进行了测量, CO_2 分析仪也同步进行对比观测。由于大气 CO_2 的 Raman 后向散射信号非常微弱,为提高信噪比,测量中需要进行长时间的积分。实验中激光发射频率为 20 Hz,设置光子计数卡积分 20000 次,每采集一组数据积分时间大约 17 min。分别选取激光雷达水平与垂直探测方向 30 m 距离处 CO_2 与 N_2 回波信号比与 CO_2 分析仪数据在 17 min 内的平均值进行对比。这里需要说明的一点是,本实验中由于 Raman 激光雷达发射光束与 Li7500 型 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 分析仪并非严格处于同一高度同一水平距离,两者水平距离相差 20 m 左右,垂直高度相差 10 m 左右,在此相隔范围内,两者周边环境相差不多,没有树木、水泊等可能对探测结果造成影响的源或汇,又因激光雷达的距离分辨率为 30 m,因此假定激光雷达探测距离水平方向与垂直方向 0~30 m 范围内的大气 CO_2 体积混合比相对恒定。如图 2(a)与(b)所示, Raman 激光雷达所测得的 CO_2 与 N_2 回波信号比与 CO_2 分析仪的数据变化趋势一致性较好,6 日与 8 日 CO_2 分析仪的最小变化量分别约为 2.0×10^{-7} 与 5.4×10^{-7} ,同时 Raman 激光雷达 CO_2 与 N_2 回波信号比的变化率分别为 2.0%与 1.76%,这表明激光雷达具有很高的灵敏性与测量的准确性。

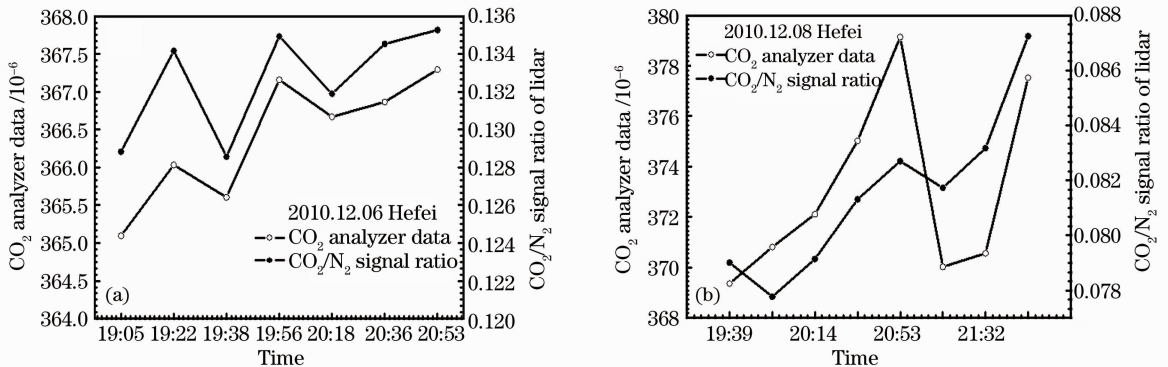


图 2 激光雷达(a)水平方向和(b)垂直方向测得的 CO_2 与 N_2 回波信号比与 CO_2 分析仪的数据对比

Fig. 2 CO_2/N_2 echo-signal ratio measured by ARL-1 Raman lidar in horizontal (a) and vertical (b) direction and comparison with CO_2 analyzer data

由(4)式,对 Raman 激光雷达系统常数的标定,可由 CO₂ 分析仪所测得的大气 CO₂ 的浓度与 CO₂ 和 N₂ 的 Raman 后向散射信号的比值求得,但是这种方法定标波动较大,精度不高,水平方向与垂直方向的平均误差分别为 1.70% 与 2.40%,如图 3 曲线 error 1 所示。大气中 CO₂ 的含量较稳定,波动较小,要最终反演大气 CO₂ 的分布廓线,定标精度要求很高。因此采用一种新的标定关系,如图 4(a)与(b)所示,将激光雷达 CO₂ 与 N₂ 的回波信号比与 CO₂ 分析仪进行数据拟合获得标定关系 $Y=kx+b$,由此即可实现激光雷达系统的标定,标定结果稳定,精度较高,标定误差如图 3 曲线 error 2 所示,水平方向最大标定误差小于 0.20%,垂直方向小于

1.40%。由图 4 标定关系可知在水平方向与垂直方向的系统常数 $C_{\text{veh}}=249.81, C_{\text{tev}}=755.02$ 。另外,由标定曲线,激光雷达与 CO₂ 分析仪数据之间存在一个补偿截距 b , b 主要补偿受限于激光雷达的机械结构、光学和电子学单元及其所有设置的参数所导致的测量结果与 CO₂ 分析仪对比产生的系统差异。为了检验激光雷达系统的长期稳定性和获得更准确的标定关系,还需要进行更多的标定实验。由这一标定关系,根据不同距离处的激光雷达回波信号比值,即可反演获得大气 CO₂ 的时空分布。如图 5 所示,给出了经过系统标定后的大气 CO₂ 体积混合比在水平方向与垂直方向的分布及其测量误差。

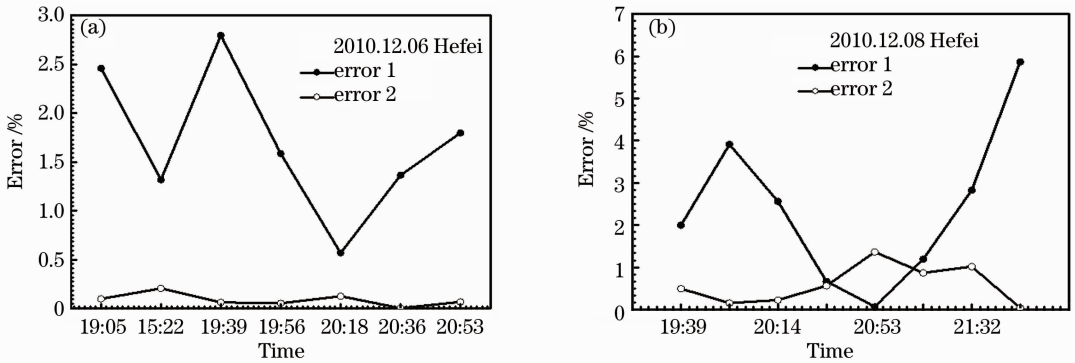


图 3 激光雷达系统在(a)水平方向和(b)垂直方向的标定误差

Fig. 3 ARL-1 Raman lidar system calibration errors in horizontal (a) and vertical (b) direction

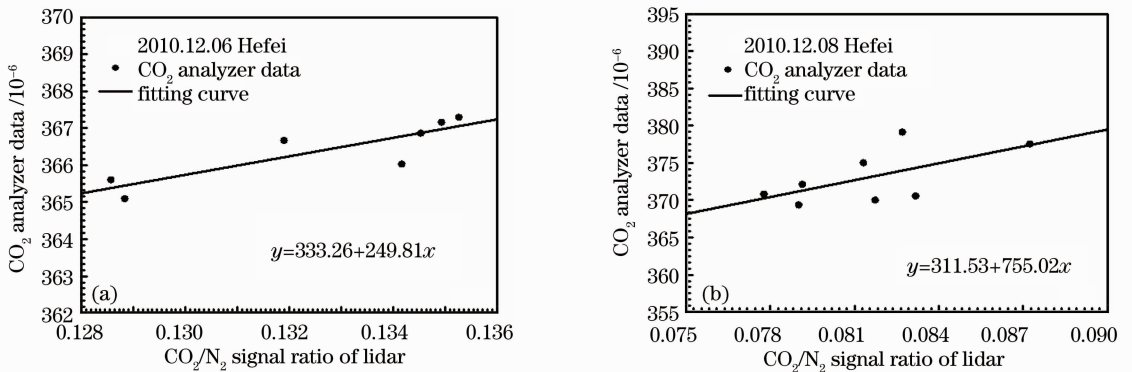


图 4 激光雷达在(a)水平方向和(b)垂直方向的系统标定曲线

Fig. 4 ARL-1 Raman lidar system calibration curves in horizontal (a) and vertical (b) direction

3 测量结果与讨论

图 5 分别给出了 ARL-1 Raman 激光雷达经过系统定标后水平方向与垂直方向大气 CO₂ 体积混合比在一定时间段内变化的典型结果。从图 5(a)中可以看出水平方向可探测距离在 2 km 左右,水平方向大气 CO₂ 的含量比较稳定,平均浓度(体积

分数)在 $3.5 \times 10^{-4} \sim 3.7 \times 10^{-4}$ 之间,1 km 以下误差小于 1%;随探测距离的增加,探测误差增大,平均误差在 1.60%,大气 CO₂ 的分布也出现了一定波动,波动在 $4 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ 之间。由图 4(b)可见,CO₂ 在垂直方向上的探测距离在 2.5 km 左右,大气 CO₂ 浓度在 1.5 km 以下变化较小,平均浓度

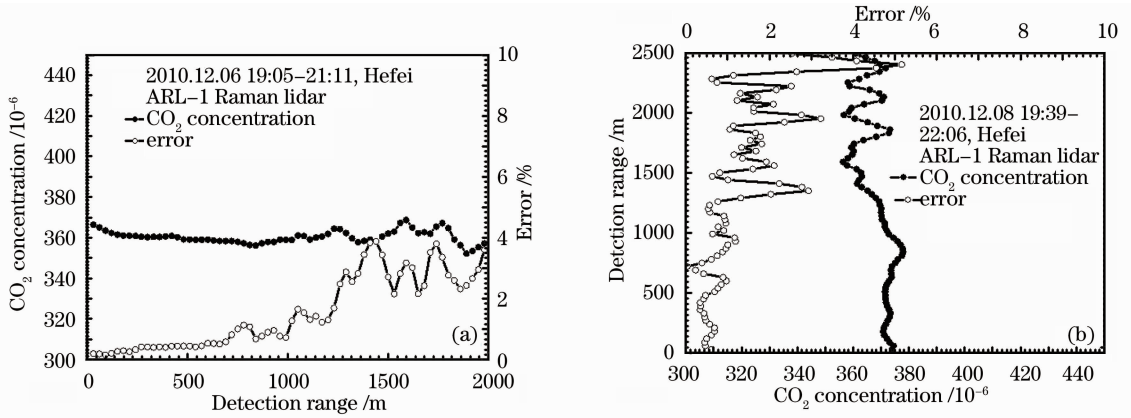


图 5 CO₂ 在(a)水平方向和(b)垂直方向的浓度廓线及误差

Fig. 5 CO₂ concentration profiles and errors measured by ARL-1 Raman lidar in horizontal (a) and vertical (b) direction (体积分数)在 $3.6 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-4}$ 之间;随探测高度的增加,1.5 km 以上回波信号变弱,相应的探测信噪比下降,探测误差增大,平均误差在 2.02%,波动达 7.4×10^{-6} 。综合图 5(a)和 5(b),CO₂ 的时空分布较稳定,这与大气中 CO₂ 的含量较稳定的认识一致,同时也说明 Raman 激光雷达可以实现对低对流层大气 CO₂ 的精确测量。

4 结 论

Raman 激光雷达是探测大气 CO₂ 分布的一种重要方法,利用中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研制成功的 ARL-1 Raman 激光雷达,分别对合肥西郊水平方向与垂直方向大气 CO₂ 进行了测量。Raman 激光雷达对采集的 CO₂ 与 N₂ 回波信号比,通过与 CO₂ 分析仪的同步观测数据对比,表明 ARL-1 Raman 激光雷达具有很高的探测灵敏性与准确性;同时对激光雷达进行系统标定,初步反演出低对流层大气 CO₂ 的分布廓线,结果表明大气 CO₂ 的含量稳定,变化较小,Raman 激光雷达可以用于常规定量观测。

参 考 文 献

- 1 Use of NOAA ESRL data. [OL]. [2012-05-23] ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt
- 2 R. K. Pachauri. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 104
- 3 B. T. Tolton, D. Plouffe. Sensitivity of radiometric measurements of the atmospheric CO₂ column from space[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1305~1313
- 4 Cheng Xuewu, Yang Guotao, Yang Yong *et al.*. Na layer and K layer simultaneous observation by lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0214001
- 程学武, 杨国韬, 杨 勇 等. 高空钠层、钾层同时探测的激光雷达[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0214001
- 5 Kaifa Cao, Bo Zhao, Xin Fang *et al.*. Fluorescence lidar for

- remote monitoring of plant[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 130~133
- 6 M. Raybaut, A. Godard, A. K. Mohamed *et al.*. A novel 2 μm, frequency conversion based, laser transmitter for CO₂ DIAL[C]. *SPIE*, **7479**: 74790G
- 7 Bo Guangyu, Xie Chenbo, Liu Dong *et al.*. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2526~2532
- 伯广宇, 谢晨波, 刘 东 等. 拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层气溶胶的光学性质[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2526~2532
- 8 D. N. Whiteman. Atmospheric CO₂ profiling using Raman lidar [R]. DDF Annum Report(NASA), FY2004
- 9 Peitao Zhao, Yinchao Zhang, Lian Wang *et al.*. Measurement of tropospheric CO₂ and aerosol extinction profile with Raman lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 157~160
- 10 Peitao Zhao, Yinchao Zhang, Lian Wang *et al.*. Capacity of Raman lidar for monitoring the variation of atmospheric CO₂ profile[J]. *Chin. Phys. B*, 2008, **17**(1): 335~341
- 11 Hu Shunxing, Zhao Peitao, Wang Shaolin *et al.*. ARL-1 Raman lidar system for atmospheric CO₂ measurements [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, **4**(6): 401~405
- 胡顺星, 赵培涛, 汪少林 等. ARL-1 Raman 激光雷达系统探测大气二氧化碳[J]. *大气与环境光学学报*, 2009, **4**(6): 401~405
- 12 D. N. Whiteman, S. H. Melfi, R. A. Ferrare. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16): 3068~3082
- 13 Sun Jingqun. Laser Atmospheric Detection[M]. Beijing: Science Press, 1986
- 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986
- 14 Liu Jun, Hua Dengxin, Li Yan. Rotational Raman lidar for daytime-temperature profiling of the atmospheric boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 755~759
- 刘 君, 华灯鑫, 李 彦. 大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 755~759
- 15 Wu Xiaoqing, Lin Xiaoqing, Zhu Xingting *et al.*. Statistic an analysis of radiation flux and CO₂ at estimation of turbulent flux using dissipation methods [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, **6**(1): 67~74
- 吴晓庆, 林晓庆, 朱行听 等. 合肥地区近地面辐射通量和二氧化碳统计分析 with 湍流通量的惯性耗散法估算[J]. *大气与环境光学学报*, 2011, **6**(1): 67~74

栏目编辑: 王晓琪