

可用于探测大气 CO₂ 垂直廓线的无线传感系统

黄 见, 胡顺星, 曹开法, 苑克娥, 时东锋

(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)

摘 要: 大气 CO₂ 是一种温室气体, 在气候变化等领域起着关键作用。基于 NDIR 技术研制了可用于探测大气 CO₂ 垂直廓线的无线传感系统。系统采用电调制型的红外辐射光源、双通道探测器并结合超低功耗单片机实现大气 CO₂ 信号的采集与控制。提出采用调制信号周期内扣除信号起伏与背景噪声的方法, 使得本系统具有 0.29% 的相对测量误差。通过分时工作的方式解决了数字式无线电探空仪中高频发射机对 CO₂ 检测电路运算放大器的电磁辐射干扰, 进而实现了气象探空仪与小型化的 CO₂ 探测系统的高度集成。通过与地面 LI-COR LI7500 对比分析, 两者表现出较好的一致性, 24 h 测量数据的相关性达 0.89, 表明所研制的探测系统的稳定性与准确性。为实现大气 CO₂ 垂直廓线的探测提供一种选择。

关键词: 大气 CO₂; 非分散红外; 无线电探空; 电磁兼容性

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0417004

Remote sensing system for vertical profiles of atmospheric CO₂

Huang Jian, Hu Shunxing, Cao Kaifa, Yuan Ke'e, Shi Dongfeng

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The atmospheric carbon dioxide (CO₂) is a greenhouse gas which plays a dominant role in climate changes and also in some other fields. The remote sensing system for vertical profiles of atmospheric CO₂ was based on non-dispersive infrared gas detection technology, which can transmit data by wireless. The modulated infrared radiation source and dual-channel detector were employed in the system which take advantage of ultra-low consumption MCU to realize automatic control and acquisition. The method of deducting the fluctuation and background noise of signal was proposed, which made the relative error at 0.29% of the detection. And the time-sharing operation mode was adopted to resolve electromagnetic interference (EMI) from high frequency transmitter of radio sounding to the operational amplifier of the CO₂ detection. The digital radio sounding of widely used in meteorology and CO₂ detection were integrated highly. The comparison analysis between self-made CO₂ remote sensing system and LI-COR LI7500 were carried out, preliminary results show that the variation trends of atmospheric CO₂ have good consistency from the two detection systems; the correlation coefficient was 0.89 from 24 hours data. It can be indicated that the self-made system has good constancy and accuracy. The self-

收稿日期: 2015-08-11; 修订日期: 2015-09-13

基金项目: 中国科学院知识创新方向性项目(KJXC2-EW-N07); 国家自然科学基金(41505019, 11404344);

基金委国家重大科研仪器设备研制专项(41127901)

作者简介: 黄见(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事大气探测技术与方法的研究。Email: jhuang@aiofm.ac.cn

通讯作者: 曹开法(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: kfcao@aiofm.ac.cn

made system offers another choice to exploit to measure the vertical profiles of atmospheric CO₂.

Key words: atmospheric CO₂; non-dispersive infrared; radio sounding; electro-magnetic compatibility

0 引言

二氧化碳是与人类生产生活息息相关的大气成份,其浓度增长导致的“温室效应”对人类的生存环境和气候变化产生了重要影响。准确可靠地测量二氧化碳的含量及其空间分布对于研究 CO₂ 的排放策略、量化 CO₂ 对气候环境变化的影响等方面意义重大。为了有效监测 CO₂ 流量变化,研究源和汇,需要达到 1×10⁻⁶ 的 CO₂ 浓度测量精度^[1]。目前我国在环境变化检测技术体系建设方面与欧美等国有较大差距,在温室气体监测仪器设备方面落后很多^[2]。因此,开展具有自主知识产权的大气 CO₂ 总量及其空间分布的探测装置及方法的研究,有着十分重要的社会价值和科学意义。

目前,大气 CO₂ 垂直分布的探测手段主要有卫星载荷^[3]、航空遥感^[4]、激光雷达^[5]及探空气球等。将探空气球作为载体搭载重量轻、集成度高的探测设备测量大气 CO₂ 的垂直廓线有许多优点,无盲区(激光雷达在近端由于几何结构造成的数据不可靠),高性价比,以及高的探测精度与空间分辨率。M. Ghysels 团队^[6]2012 年报道了采用 2.68 μm 的激光二极管作为光源,采用开放式的 50 cm 长的气室结构,研制了球载 CO₂ 传感器用于探测对流层顶及低平流层区域大气 CO₂ 浓度,文中指出在 200 ms 测量时间内的精度误差为±2 ppm,没有给出探测的垂直廓线。中国科学院城市环境研究所李燕丽博士^[7]等人在 2014 年报道了所开展的大气边界层以下 CO₂ 垂直分布探测研究,通过系留球的方式搭载芬兰 VAISALA 公司的 GMP343 CO₂ 传感器测量对应高度上大气 CO₂ 的浓度,结合气象参数对 800 m 以下空间 CO₂ 的时空变化特征进行了分析。此外,许多科研工作者开展了基于 NDIR 技术的 CO₂ 浓度监测装置^[8-12],但是基本上都是应用于地面环境 CO₂ 的监测。

目前,高精度、高分辨率的大气 CO₂ 垂直分布数据相对较少,主要是缺乏相应的探测设备。文中首先分析了系统的测量原理,介绍了所研制的无线传感系统的硬件构成。通过提出的方法,实现了较高的测

量精度。高度集成了气象上广泛使用的无线电探空仪与 CO₂ 监测系统,使得整套测量系统具备了无线传输、遥测大气 CO₂ 浓度、气象参数的能力。最后给出了前期地面大气 CO₂ 测量数据及其对比结果。

1 测量原理

对单色光,气体吸收满足 Beer-Lambert 定律:

$$I=I_0\exp(-\sigma\cdot c\cdot L) \quad (1)$$

式中: I 为透射光强; I_0 为初始光强; σ 为气体的吸收截面; c 待测气体浓度; L 为气室长度。对于典型的 NDIR 气体检测系统,主要包括宽带红外光源、光学气室、双通道探测器及数据采集与处理单元。该系统采用的探测器型号为 HTS-E21-F3.91/F4.26,该探测器上集成了两个中心波长不同的滤光片,其中 F4.26 通道滤光片的中心波长为 4.26 μm,对应 CO₂ 的强吸收线上,滤光片的(Half Power Bandwidth, HPB)为 180 nm;F3.91 通道滤光片的中心波长为 3.91 μm,CO₂ 在此波段无吸收,滤光片的 HPB 为 90 nm,主要用于补偿和参考作用。按照该探测器滤光片透过率与带宽,计算出 4.26 μm 通道等效的吸收截面约为 6.3×10⁻¹⁹ cm⁻¹,该吸收截面比 1.6 μm、2.0 μm 及 2.7 μm 附近的要大得多,因此在相同气象参数与气室长度下,保证测量系统能够获得较高的探测信噪比。

对于 F4.26 CO₂ 强吸收通道与 F3.91 参考通道输出信号 I_A 、 I_B 分别为:

$$I_A=I_0 \int E(\lambda)T_A(\lambda)\exp[-\sigma(\lambda)\cdot c\cdot L-\alpha]d\lambda \quad (2)$$

$$I_R=I_0 \int E(\lambda)T_R(\lambda)\exp[-\alpha']d\lambda \quad (3)$$

式中: $E(\lambda)$ 为宽带光源在滤光片带宽范围内的辐射能量; $T_A(\lambda)$ 为 F4.26 通道滤光片的透过率; $T_R(\lambda)$ 为 F3.91 通道滤光片的透过率; α' 为除大气 CO₂ 以外气体的吸收系数,在 $\sigma\cdot c\cdot L\ll 1$ 情况下,由公式(2)、(3)可得:

$$S=c\cdot\sigma^*\cdot L=\left(1-\frac{I_{OR}}{I_{OA}}\cdot\frac{I_A}{I_R}\right) \quad (4)$$

式中: I_{OA} 、 I_{OR} 分别为通入零气时 F4.26 CO₂ 强吸收通道与 F3.91 参考通道输出的信号,令 $K=\frac{I_{OR}}{I_{OA}}$,其为一

常数,文中初步将其设定为 0.75,其大小不影响 CO₂ 信号的变化趋势。 σ^* 为等效的吸收截面, S 为气体等效吸收度,无量纲。可见,大气 CO₂ 的浓度 c 正比于吸收度 S 。通过检测双通道探测器的输出信号 I_A 与 I_R 通过线性拟合即可得出大气 CO₂ 的浓度 c 。其中公式(4)中的等效吸收截面 σ^* 与大气温度的压强有关,因此当进行遥测大气 CO₂ 垂直廓线时,需通过实测的气象参数对测量结果进行修正。文中仅给出部分地面上测量实验结果。

2 系统设计

2.1 系统硬件构成

大气 CO₂ 无线传感系统结构图如图 1 所示。图 1(a) 为自行研制的大气 CO₂ 检测系统。红外宽带光源为 EMIRS200,光学气室是直径为 18 mm、长为 48 cm 的不锈钢管,在气室两端开有进气与排气口。环境气体

经滤膜后被气泵抽运到气室中,流量计控制气流的速度。CO₂ 测量系统主控器件为 TI 公司超低功耗单片机 MSP430F149。MSP430F149 单片机定时器 A 产生 0.5 s 中断,实现 1Hz、50% 占空比的 PWM 光源调制信号。红外光源在调制信号的驱动下,产生周期性的红外辐射经气室内 CO₂ 气体吸收衰减后照射到双通道探测器上,探测器输出的电信号经前置放大、滤波后由单片机内置 12 位精度的模数转换器实现信号采集。最后单片机将采集到的数据通过串口发送到图 1(b)的发射电路中。图 1(b)发射电路将 GPS 模块(可选)接收的定位信号、温湿压模块(可选)测量的所处环境的温、湿、压气象参数以及表征大气 CO₂ 浓度的信号进行调制发射,实验室内接收终端(图 1(c))实现数据的接收与显示。整个无线发射系统(图 1 中的(a),(b)两部分)重量可控制在 0.75 kg 以内。探测系统的实物图如图 2 所示。

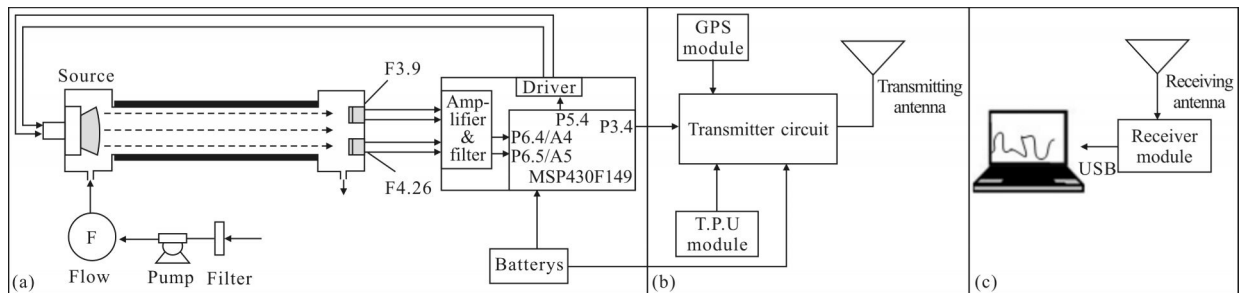
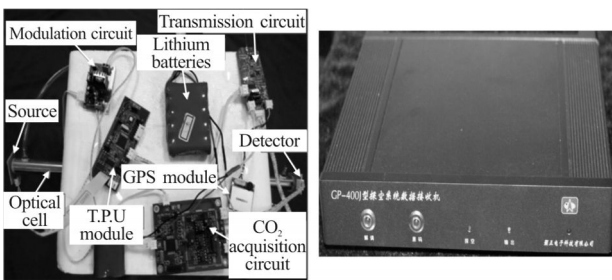


图 1 CO₂ 测量及无线传输系统结构图

Fig.1 Diagram of atmospheric CO₂ measurement and wireless transmission system



(a) 信号测量与发射单元 (b) 数据接收机
(a) Signal measurement and transmission (b) Data receiver

图 2 测量装置

Fig.2 Photograph of the instruments

2.2 数据质量控制

图 3 给出了红外光源在脉冲调制工作方式下调

制脉冲电压(图 3(a))与光源输出电流(图 3(b))、发出辐射能(图 3(c))及数据采集时刻(图 3(d))之间的示意图。从图中可以看出光源在 PWM 调制信号的高电平前沿,流过光源的电流迅速增大,光源的热辐射渐渐上升,本系统所采用的光源其典型的加热稳定时间为 11 ms。因此,如果在光源调制信号前沿处就开始数据采集,则采集到数据起伏较大。同理,在调制信号的低电平前沿处,也是如此。为了避免光源调制信号起始时光源不稳定带来输出信号起伏较大的影响,对两个通道在调制信号的高、低电平期间都进行一定的延时后再进行数据采集。在一个周期内,分别在调制信号高、低电平期间延时累计采样 200 次。

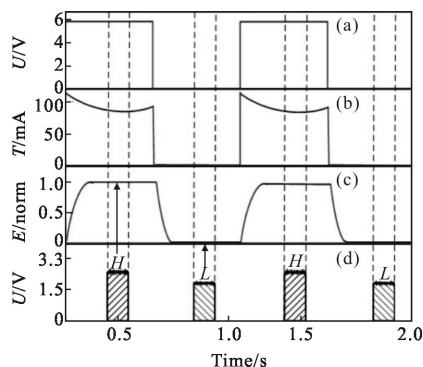


图 3 数据采集与光源调制信号关系

Fig.3 Relationship between data measurement time and modulation signal

图 4 为大气 CO₂ 测量单元(图 1(a))主控单片机 MSP430F149 工作流程图。通过在单片机定时器 A 的中断程序中设定逻辑标志 flag, 该标志与调制信号同步翻转。当 flag=1 时, 表明此时在调制信号的高电平期间, 延时 200 ms 后再对双通道信号进行连续采集 200 次; 当 flag=0 时, 表明此时在调制信号的低电平期间, 同样延时 200 ms 后再进行数据采集。记 $I_{A,H200}$ 、 $I_{A,L200}$ 分别为 F4.26 通道在调制信号高、低电平期间采集 200 次的累加和, $I_{R,H200}$ 、 $I_{R,L200}$ 分别为 F3.91 通道在调制信号高、低电平期间采集 200 次的累加和, 因此可得周期为 1 s F4.26 与 F3.91 两通道扣除信号起伏与噪声影响的信号 $I_A = I_{A,H200} - I_{A,L200}$ 及 $I_R = I_{R,H200} - I_{R,L200}$ 。最后通过将 I_A 与 I_R 转换为 ASCII 码发送给无线发射电路。

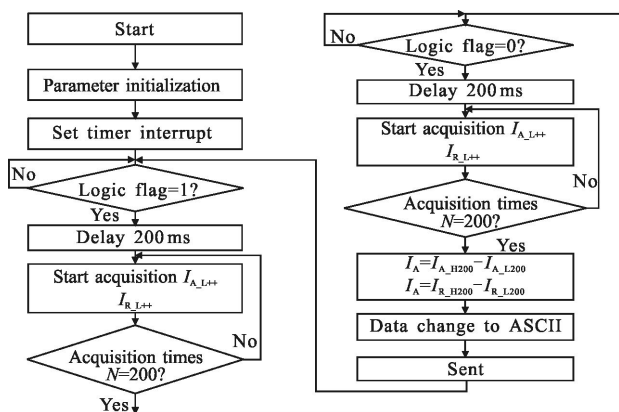


图 4 大气 CO₂ 数据采集流程图

Fig.4 Flow diagram of atmospheric CO₂ data measurement

2.3 电磁兼容性设计

探测器 HTS-E21-F3.91/F4.26 输出的模拟电压

典型值只有几十微安, 若要达到 MSP430 单片机内置模数转换器输入端所需的电压量级 (V 级), 要进行放大倍数约 90 dB 左右的放大。在实际电路中, 运算放大器输入阻抗都很高, 一般都在 MΩ 量级或更高, 因此运算放大器输入端很容易串入干扰信号, 尽管有时串入的干扰信号量值很小, 但由于检测系统输出的有用的 CO₂ 信号也很小。当干扰信号量值与有用信号相当, 就会造成运算放大器的输出信号严重失真。本系统集成于气象上数字式无线电探空仪来实现 CO₂ 信号的传输与接收, 缩短了系统研制周期。然而, 气象上使用的数字式无线电探空仪发射机工作频率为 403±3 MHz, 发射功率最大为 200 mW, 此高频信号很容易对 CO₂ 测量电路中的高增益运算放大器产生辐射干扰, 使得运算放大器的输出信号严重失真, 影响了系统探测性能。尝试通过屏蔽、接地等手段仍然无法解决信号失真、误码等问题。文中最终通过分时工作的方式避免高频的辐射信号对运算放大器的干扰。原理如图 5 所示。CO₂ 测量电路按照下文介绍的方式进行数据采集, 此时发射机处于关闭状态, 当数据采集完毕, MSP430F149 单片机通过串口将数据发送到发射电路板上, 同时产生一发射同步握手信号给发射电路板, 发射电路板接收到此同步信号后, 启动发射机实现数据传输。数据传输过程中, CO₂ 测量电路停止数据采集, 数据发射完毕, 发射机停止工作, 等待下一发射同步信号。通过这种交替采集与发射的方式, 虽然降低了数据的时间分辨率, 但是提高了数据质量与可靠性。

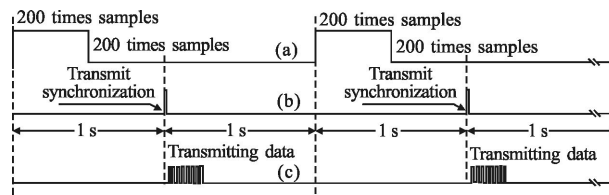


图 5 分时工作原理图

Fig.5 Time-sharing operation schematic diagram

3 测量系统的相对误差与结果分析

3.1 误差推算

通过实验推算 CO₂ 探测系统的相对误差。分别记录探测系统在 PWM 调制信号高、低电平期间采集的数据。在调制信号低电平期间, 光源两端没有电

流流过,采集时刻比调制信号前沿延迟 200 ms 的状况下,光源不向外发出红外辐射(光源典型冷却时间为 17 ms),此时由 $S_L=1-0.75 \frac{I_{A,1200}}{I_{R,1200}}$,计算得到 S_L 的平均值为 0.034 39,如图 6 中的 *a* 段,理论上 S_L 应该为零,但是由于探测系统的背景噪声(如电子学噪声、气流抖动噪声等)的影响,该值在零值附近波动,可以认为该值是系统的固有噪声,其决定了系统的测量精度, S_L 抖动的 rms 为 3.43×10^{-4} 。通过 $S_{\text{signal}}=1-0.75 \frac{I_{A,1200}-I_{A,1200}}{I_{R,1200}-I_{R,1200}}$ 计算此段时间内等效吸收度 S_{signal} ,其平均值为 0.151 12,如图 6 中的 *b* 段,*b* 段信号主要体现实际大气 CO₂ 波动情况,吸收度由 $S_L \sim S_{\text{signal}}$ 变化量为 $\delta=0.116 73$,因此吸收度的相对测量误差约为 0.29%,由于吸收度与大气 CO₂ 浓度成正比,因此表明该探测系统测量大气 CO₂ 的相对误差为 0.29%。

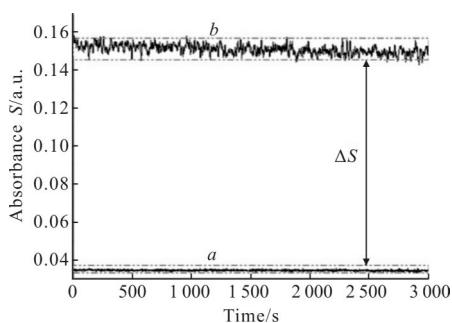


图 6 系统相对误差

Fig.6 Relative error of our system

3.2 测量结果

图 7 为 2014 年 12 月 26 到 28 日共 3 天采集的数据,CO₂ 无线传感系统放置于实验室的走廊,通过气泵抽运环境中的大气进入气室。采集的 CO₂ 信号通过无线传输,由放置于实验室内的探空接收机实现信号的接收,由终端计算机实现数据的存储与显示。实验数据对比用的 LI-COR LI7500 放置于距实验室外 400 m 的 35 m 铁塔上。将两套装置获取的数据按照时间顺序对应起来。由于 LI-COR LI7500 采集到的原始数据时间分辨率为 20 s,而研制的 CO₂ 探测系统时间分辨率为 2 s,因此将两套系统的时间分辨率统一平均为 1 s。从图中可以看出两套仪器所探测的 CO₂ 变化趋势一致性很好,测量数据均体现了 CO₂ 的昼夜变化特征。对两套系统在 2014 年 12 月 27 日凌晨到 28 日凌晨之间 24 h 数据进行相关性分

析,如图 8 所示。24 h 的数据相关系数为 0.899 2。表明,所研制的无线传感的稳定性与准确性。后期通过购买标准浓度 CO₂ 气体与零气对系统进行绝对定标,研究系统对温度、压强的气象参数变化的敏感性等问题。

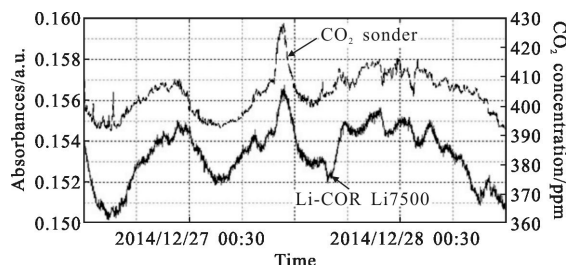


图 7 与 LI-COR LI7500 初步对比结果

Fig.7 Preliminary result of our instrument and LI-COR LI7500

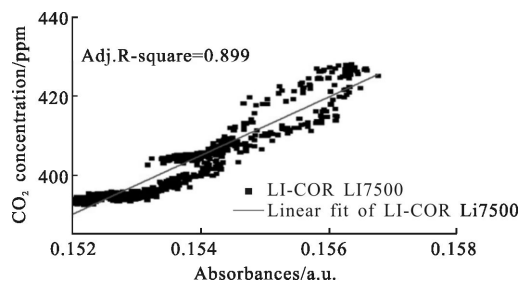


图 8 与 LI-COR LI7500 相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of our instrument and LI-COR LI7500

4 结论

基于NDIR 设计原理,研制了具备无线电探空能力的大气 CO₂ 测量系统。采用延时数据采集的方式,扣除起伏非平稳信号与背景噪声的方法,使得探测系统获得较高的测量精度。通过分时工作解决了无线电探空仪中高频发射机对 CO₂ 检测电路运算放大器的影响。通过连续 3 天测试实验分析表明,所研制的无线传感系统与 LI-COR LI7500 CO₂ 分析仪所观测到的 CO₂ 信号具有较好的一致性,24 h 观测数据的相关性接近 0.9。表明研制的探测系统所测结果是可靠的。进一步研究通过标准气体对探测系统进行标定及研究探测系统对气象参数的敏感性。通过优化系统重量、体积等,尝试将所研制的探测系统搭载于无人模型飞机或者气象气球上用于探测大气 CO₂ 垂直廓线,为实现大气 CO₂ 空间分布的探测提供一种选择,对气候变化、CO₂ 源汇计算等方面都有着重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Xie Yangyi, Liu Jiqiao, Jiang Jiabin, et al. Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO₂ concentration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88–93. (in Chinese)
谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使 CO₂ 浓度测量误差减小的星载激光雷达波长优化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 88–93.
- [2] Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, et al. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (12): 176–181. (in Chinese)
袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO₂ 监测仪[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 176–181.
- [3] Yan Fanghou, Shi Xinwang, Yi Zhou, et al. Analysis of the carbon dioxide concentration in the lowest atmospheric layers and the factors affecting China based on satellite observations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(6): 1981–1994.
- [4] James B Abshire, Haris Riris, Clark J Weaver, et al. Airborne measurements of CO₂ column absorption and range using a pulsed direct-detection integrated path differential absorption lidar [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4446–4461.
- [5] Liu Hao, Tao Chen, Shu Rong, et al. Wavelength-locking-free 1.57 μm differential absorption lidar for CO₂ sensing [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27675–27680.
- [6] Ghysels M, Amarouche N, Cousin J, et al. A lightweight balloon-borne laser diode sensor for the in-situ measurement of CO₂ at 2.68 micron in the upper troposphere and the lower stratosphere [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107 (1): 213–220.
- [7] Li Yanli, Deng Junjun, Mu Chao, et al. Vertical distribution of CO₂ in the atmospheric boundary layer: characteristics and impact of meteorological variables [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 91(1): 110–117.
- [8] Pierre Barritault, Michael Brun, Olivier Lartigue, et al. Low power CO₂ NDIR sensing using a micro-bolometer detector and a micro hotplate IR-source [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 182(6): 565–570.
- [9] Karsten Kühn, Eliseo Pignanelli, Andreas Schütze. Versatile gas detection system based on combined NDIR transmission and photoacoustic absorption measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(3): 934–940.
- [10] Jane Hodgkinson, Richard Smith, Wah On Ho, et al. Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 186 (186): 580–588.
- [11] Sun Youwen, Liu Wenqing, Wang Shimei, et al. Research on the method of interference correction for non dispersive infrared multi-component gas analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 10: 2719–2724. (in Chinese)
孙友文, 刘文清, 汪世美, 等. NDIR 多组分气体分析的干扰修正方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 10: 2719–2724.
- [12] Feng Lin, Hu Shunxing, Huang Jian, et al. A new method for atmospheric CO₂ balloon sonde measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 92–97. (in Chinese)
冯林, 胡顺星, 黄见, 等. 一种新的 CO₂ 探空测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 92–97.