

## 机载激光雷达测量二氧化碳浓度误差分析

史成龙<sup>1,2</sup>, 刘继桥<sup>1</sup>, 毕德仓<sup>1</sup>, 李世光<sup>1</sup>, 刘丹<sup>1</sup>, 陈卫标<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 差分吸收激光雷达是高精度测量大范围二氧化碳浓度的有效手段。研究了机载路径积分差分吸收激光雷达测量二氧化碳柱线浓度的主要误差项, 分析了这些误差项导致的二氧化碳柱线浓度反演误差。介绍了机载差分吸收激光雷达基本工作原理, 并理论分析了大气温度、压强和水汽不确定性误差, 激光频率稳定性和飞机姿态速度测量不确定性等系统误差, 以及不同地表反射率产生的随机误差。分析结果表明: 在二氧化碳浓度 380 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>) 时, 机载激光雷达二氧化碳柱线浓度综合测量误差约为 0.71 ppm, 满足 1 ppm 的二氧化碳柱线浓度高精度测量需求。

**关键词:** 二氧化碳浓度; 路径积分差分吸收; 机载激光雷达; 误差

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0530001

## Errors analysis of dioxide carbon concentrations measurement by airborne lidar

Shi Chenglong<sup>1,2</sup>, Liu Jiqiao<sup>1</sup>, Bi Decang<sup>1</sup>, Li Shiguang<sup>1</sup>, Liu Dan<sup>1</sup>, Chen Weibiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Differential absorption lidar is an effective methods for high-precision CO<sub>2</sub> concentration measurements. In this paper, the major error sources of airborne differential absorption lidar CO<sub>2</sub> measurement were studied, and CO<sub>2</sub> concentration errors caused by them were analyzed. The airborne differential absorption lidar principle was introduced first, CO<sub>2</sub> concentration errors from atmospheric temperature, pressure and water vapor uncertainties, laser frequency stability and the aircraft speed and attitude measurements uncertainties, as well as random error were analyzed. The results show that airborne differential absorption lidar measured CO<sub>2</sub> column concentration error is about 0.71 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>) for 380 ppm atmosphere CO<sub>2</sub> concentration, which meets the 1 ppm accuracy requirement of CO<sub>2</sub> concentration measurement.

**Key words:** CO<sub>2</sub> concentration; integrated path differential absorption (IPDA); airborne lidar; error

收稿日期: 2015-09-10; 修订日期: 2015-10-10

基金项目: 民用航天项目(1105231-CAO)

作者简介: 史成龙(1988-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: shitousenlin@126.com

导师简介: 陈卫标(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光遥感和空间激光器等方面的研究。Email: wbchen@mail.shenc.ac.cn

通信作者: 刘继桥(1978-), 男, 研究员, 主要从事激光遥感和激光雷达技术器方面的研究。Email: x\_qiao@siom.ac.cn

## 0 引言

大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)目前被认为主要是人类活动产生的重要温室气体,目前对全球 CO<sub>2</sub> 浓度分布及其流向有很大不确定性。气象研究和预报对于 CO<sub>2</sub> 的源和汇有直接需求。根据 IPCC 第四次评估报告<sup>[1]</sup>指出,超过 50%的 CO<sub>2</sub> 是化石燃料燃烧造成的。根据报告,陆地上 CO<sub>2</sub> 不确定性高达 70%,而在海洋中的不确定性估计为 25%。报告还指出,大气 CO<sub>2</sub> 源和汇有以下特点:区域性和时间性变化大。基于此原因,需要在不同的区域和时间范围内研究 CO<sub>2</sub> 的源和汇,解决全球气候变化预测问题。

为了有效减少监测的源和汇的不确定性,基于空间探测 CO<sub>2</sub> 浓度误差需要控制在~0.3%的精度左右,在大气 CO<sub>2</sub> 浓度 380 ppm 时误差约为 1 ppm<sup>[2]</sup>。虽然已经有采用被动式光谱技术来研究 CO<sub>2</sub> 浓度问题,其中日本的温室气体观测卫星 GOSAT (Japanese Greenhouse Gases Observing Satellite)任务目前在太空中利用近红外光谱技术监测全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[3]</sup>,然而,被动光谱探测受到很多限制<sup>[4]</sup>,包括太阳天顶角度问题、大气气溶胶散射及云层干扰<sup>[5-6]</sup>等问题决定了被动探测只适用于中低纬度,而且限制在白天且无云状态下测量。被动光谱探测 CO<sub>2</sub> 浓度的精度一般在 3~4 ppm。为了提高卫星测量全球 CO<sub>2</sub> 浓度的精度,美国 NASA 和欧空局在 2008 年分别提出了星载主动激光 CO<sub>2</sub> 测量卫星计划,即 ASCENDS (Active Sensing of CO<sub>2</sub> Emissions over Nights, Days, and Seasons)卫星<sup>[7]</sup>和 A-SCOPE (Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth)卫星<sup>[8-9]</sup>,采用积分路径的差分吸收(IPDA)激光雷达方法测量全球 CO<sub>2</sub> 浓度平均分布。

中国科学院上海光学精密机械研究所开展了 IPDA 激光雷达测量 CO<sub>2</sub> 柱线浓度的研究<sup>[9]</sup>,开展了星载系统优化分析,采用双波长脉冲直接测量方法。为了验证在星载系统下测量性能,建立了缩比机载 IPDA 激光雷达验证系统,文中对于机载激光雷达系统测量 CO<sub>2</sub> 柱线浓度误差进行了理论分析,为机载系统参数优化和数据反演提供重要参考。

## 1 基本原理

机载差分吸收激光雷达系统发射出两束窄线宽、频率稳定、波长相近的激光束,其中一束波长位于 CO<sub>2</sub> 吸收谱线吸收峰值附近,称之为 on-line。另外一束位于 CO<sub>2</sub> 谱线吸收谷底处,称之为 off-line。文中选取优化的激光发射源工作波长 on-line 为 6 361.225 0 cm<sup>-1</sup>, off-line 为 6 360.979 cm<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>。激光雷达系统通过测量两束激光发射功率以及地表反射的回波信号功率,结合权重函数分布,反演出测量路径上 CO<sub>2</sub> 柱线浓度。机载 IPDA 激光雷达系统参数如表 1 所示。

表 1 机载 IPDA 激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters of IPDA lidar system

Parameter	Value	Parameter	Value
Laser wavelength	1 572 nm	Background filter bandwidth	0.4 nm
Pulse energy	1.5 mJ	Repetition frequency	50 Hz
Laser divergence angle	0.2 mrad	Equivalent noise power	57 fW/Hz <sup>0.5</sup>
Receiving angle of view	0.5 mrad	Reflectivity (surface)	0.3 sr <sup>-1</sup>
Receiving telescope	Φ200 mm	Reflectivity (ocean)	0.035 sr <sup>-1</sup>
Integrate time	200 ns	Background radiation(land)	5 mW/(m <sup>2</sup> ·nm·sr)
Optical efficiency	0.55	Background radiation(ocean)	1.7 mW/(m <sup>2</sup> ·nm·sr)
Height of platform	4 km	Measurement precision of platform attitude	0.01°
Measurement precision of platform velocity	0.1 m/s		

激光雷达接收回波信号功表示为:

$$P_{on,off}(r_G) = D_{on,off} \frac{A}{2} O_{on,off} \tau_{on,off}^2 \frac{E_{on,off}}{\Delta t_{eff}} \quad (1)$$

式中:  $P_{on,off}$  为 on-line 和 off-line 激光束通过地面反射进入到探测望远镜的回波功率;  $D_{on,off}$  为包括发射

系统、探测系统在的系统光学效率;  $A$  为望远镜口径;  $O_{on,off}$  为发射激光光束与望远镜接收视场角之间的重叠函数;  $Q(sr^{-1})$  为地面反射系数, 代表单位立体角内反射能量。对于理想朗伯反射面,  $Q$  定义为  $Q^*/\pi$ ,  $Q^*$  为地面反射率;  $\tau_{on,off}^2$  为大气双程透过率;  $E_{on,off}$  为激光发射能量。

公式(1)中一项重要参数为  $\Delta t_{eff}$ , 代表有效激光脉冲宽度。

$$\Delta t_{eff} = \sqrt{\Delta \tau_1^2 + \left(\frac{1}{3B}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta h}{c}\right)^2} \quad (2)$$

式中:  $\Delta \tau_1$  为激光脉冲长度;  $B$  为探测器带宽;  $\Delta h$  为激光光斑照射地面时地形变化高度差。

对于路径积分雷达, 由差分吸收雷达方程<sup>[10]</sup>得到:

$$-2 \int n_{air} \rho \Delta \sigma(P, T) dr = \ln \frac{P_{on}}{P_{off}} \frac{E_{on}}{E_{off}} \quad (3)$$

式中:  $n_{air}$  为大气分子数密度, 可由标准大气方程得到;  $\rho$  为  $CO_2$  浓度;  $\Delta \sigma(P, T)$  为 on-line 和 off-line 的差分吸收截面, 与大气的温度、气压有关。定义权重函数

$$W(P, T) = -n_{air} \Delta \sigma(P, T) \frac{dr}{dp} \quad (4)$$

那么公式(3)可改为:

$$\rho \int W(P, T) dp = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{on}}{P_{off}} \frac{E_{on}}{E_{off}} \quad (5)$$

由理想气体方程和流体静力学方程得:

$$-\frac{dr}{dp} = \frac{RT}{pMg} \quad (6)$$

式中:  $R$  为普适气体常数;  $M$  为空气摩尔质量;  $g$  为重力加速度。由公式(5)可得:

$$WF(P, T) = \frac{\Delta \sigma_{CO_2}}{\left(1 + \frac{m_{H_2O}}{m_{dryair}} \rho_{H_2O}\right) m_{dryair} g} \quad (7)$$

式中:  $m_{H_2O}$  和  $\rho_{H_2O}$  分别指水分子和一个干空气分子平均质量;  $\rho_{H_2O}$  为水分子混合比。

定义积分权重函数:

$$IWP = \int \frac{\Delta \sigma_{CO_2}}{\left(1 + \frac{m_{H_2O}}{m_{dryair}} \rho_{H_2O}\right) m_{dryair} g} dp \quad (8)$$

因此, 大气二氧化碳柱线浓度  $\rho$  表示为:

$$\rho = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{on}}{P_{off}} \frac{E_{on}}{E_{off}} \frac{1}{IWP} \quad (9)$$

## 2 二氧化碳柱线浓度测量误差分析

### 2.1 温度不确定性误差

由公式(3)、(4)可知, 差分吸收截面和积分权重函数是温度和压强的函数, 计算  $CO_2$  线浓度需要获得路径上温度和压力数值。因此, 测量大气温度、压强的准确性会对光学厚度计算产生影响, 进而对最终反演  $CO_2$  浓度产生误差。图 1 给出了机载平台 4 km 飞行高度时,  $CO_2$  和  $H_2O$  水汽的单程光学厚度变化, 并给出了优化工作波长, 即 on-line 和 off-line 波长分别为  $6361.2250 \text{ cm}^{-1}$  和  $6360.979 \text{ cm}^{-1}$ , 其中吸收线中心波长为  $6361.2504 \text{ cm}^{-1}$ 。由图可以看出, 在 on-line 波长处, 光学厚度(OD)为 0.2724。

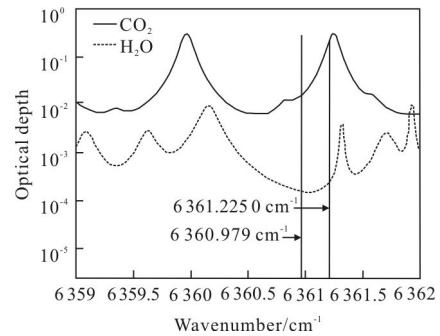


图 1 4 km 高度计算的  $CO_2$  与  $H_2O$  的单程光学厚度

Fig.1 OD of  $CO_2$  and  $H_2O$  at 4 km

由于大气温度和压强随时间变化, 因此测量的数值准确性很重要。现有仪器温度测量精度约  $1^\circ C$ , 压强精度可达 100 Pa, 相对湿度精度达到 10%。结合美国标准大气模型进行理论计算, 分析温度和压力数据不确定性对于反演  $CO_2$  误差影响。

公式(4)右边又称为差分光学厚度(DAOD), 代表 on-line 与 off-line 两波长处  $CO_2$  光学厚度之差。考虑水汽影响, 大气中  $CO_2$  浓度误差可以定义为:

$$\rho = (\Delta \tau_{CO_2} - \Delta \tau_{H_2O}) / IWP \quad (10)$$

则由温度不确定性引起的浓度误差为:

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = - \left[ \frac{1}{\Delta \tau_{CO_2}} \frac{d \Delta \tau_{CO_2}(T + \delta T)}{d \delta T} + \frac{1}{IWP} \frac{d IWP(T + \delta T)}{d \delta T} \right] \delta T \quad (11)$$

式中:  $\delta T$  为温度微小变化量。

图 2 给出了 on-line 波长与吸收峰波长温度不确定性造成的相对系统误差(RSE), 分析可知在不同

温度不确定情况下, 在吸收峰波长所造成的相对系统误差要比在优化波长造成的相对系统误差要大, 即说优化后波长具有更小的温度敏感度。图 2 中, 在 1 K 温度不确定下, 相对随机误差为 0.000 775, 在 CO<sub>2</sub> 平均浓度为 380 ppm 情况下(下述计算相同), 造成的浓度误差为 0.294 5 ppm。

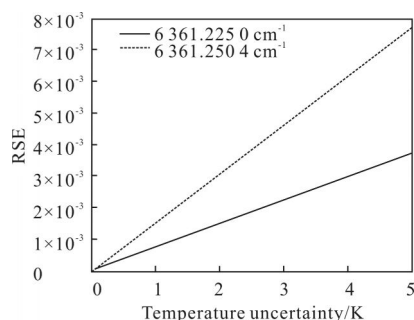


图 2 on-line 波长与吸收峰波长温度不确定性造成的相对系统误差

Fig.2 RSE error changed with temperature uncertainty for on-line and absorption peak wavelength

## 2.2 压强和水汽不确定性误差

压强和水汽造成的误差可表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = -\left[ \frac{1}{\Delta\tau_{CO_2}} \frac{d\Delta\tau_{H_2O}[y(z)(1+\varepsilon)]}{dz} \right] + \frac{1}{IWP} \cdot \frac{dIWP[y(z)(1+\varepsilon)]}{dz} \varepsilon \quad (12)$$

式中:  $y(z)$  代表压强或者水汽随高度变化模型;  $1+\varepsilon$  为变化比例因子。

on-line 波长在大气压力 100 Pa 不确定度所造成的误差为 0.000 3, 由此造成的 CO<sub>2</sub> 浓度误差为 0.113 9 ppm。不同压强不确定度引入的相对系统误差如图 3 所示。

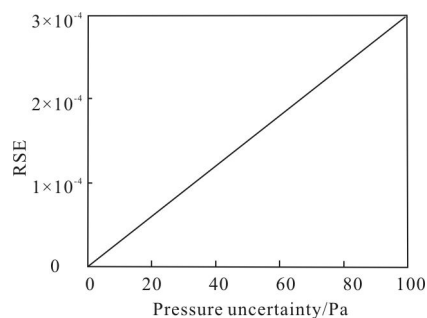


图 3 不同压强不确定度引入的相对系统误差

Fig.3 RSE error changed with pressure uncertainty

通过分析, 在水汽不确定度为 10% 情况下, 相对系统误差为 0.000 408 4, 造成的 CO<sub>2</sub> 浓度测量误差为 0.155 2 ppm。不同水汽不确定度引入的相对系统误差如图 4 所示。

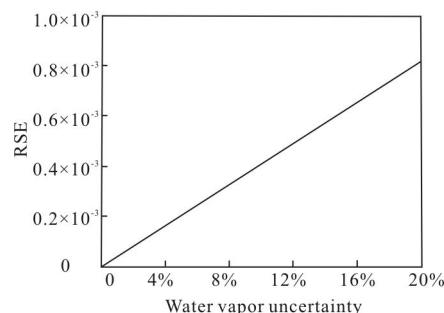


图 4 不同水汽不确定度引入的相对系统误差

Fig.4 RSE error changed with water vapor uncertainty

## 2.3 激光器频率稳定性误差

不同的激光频率对应的 CO<sub>2</sub> 吸收截面差别很大, 因此, 激光器输出频率稳定性也会造成最终探测 CO<sub>2</sub> 浓度误差。激光器频率稳定性带来的误差可用光谱斜率来表示:

$$RE = \frac{1}{OD} \frac{\partial OD}{\partial f} \delta f \quad (13)$$

另外, 由于 off-line 处光谱斜率很小, 且 off-line 处光学厚度小, 因此 off-line 处频率稳定性带来的误差很小, 可忽略不计。由公式(12)式可求得 on-line 处频率不稳定性带来的误差, 如图 5 所示。

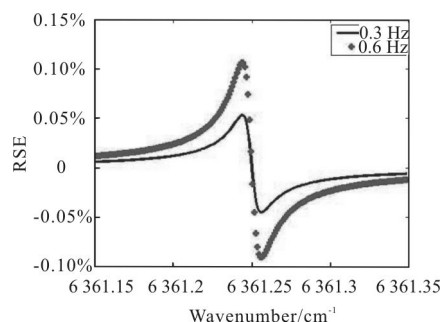


图 5 不同激光器频率稳定性下引入的相对系统误差

Fig.5 RSE error changed with laser frequency stability

在吸收峰 6361.250 4 cm<sup>-1</sup> 附近频率抖动带来的误差很大, 偏离吸收峰误差会变小。另外, 频率抖动越大, 带来的误差越大, 如图 5 所示, 计算在激光频率稳定性分别为 0.3 MHz 和 0.6 MHz 带来的浓度误差分别为 0.11 ppm 和 0.24 ppm。

### 2.4 相对随机误差

相对随机误差定义为:

$$RRE = \frac{\Delta DAOD}{DAOD} = \frac{1}{2DAOD\sqrt{N}SNR} \quad (14)$$

式中:  $N$  为激光雷达探测脉冲次数;  $SNR$  为接收信噪比。

由公式(1)可知,大气回波信号由望远镜接收后进入探测器,然后由数据采集卡采集。机载激光雷达在实际工作过程中,在基本固定的平台工作高度下,回波信号功率或信噪比主要与地面反照率有关,多次测量可以降低误差。回波信号由地表反射,地面或者水面的反射率  $Q$  由于地表植被、高低起伏等原因存在不确定性。计算了低信噪比情况下随机误差,选取水面反射率  $0.035 \text{ sr}^{-1}$ , on-line 在 4 km 高度,脉冲累加数为 350 时,相对随机误差为 0.001 578,对应  $\text{CO}_2$  柱线浓度绝对误差为 0.59 ppm。

### 2.5 飞机姿态和速度引入误差分析

飞机飞行中姿态角会变化,这就导致激光发射光束不是垂直于地面,而与地面法线有一个较小的夹角。飞机相对于地面运动时,由于夹角存在产生垂直于地面的分速度,从而引起回波信号的多普勒效应,导致激光中心频率出现频移,频移量为:

$$\Delta\nu = \frac{V_u \sin\theta}{c} \quad (15)$$

在飞机速度  $V=250 \text{ km/h}$ , 飞机惯导姿态测量精度  $\theta=0.01^\circ$ , 惯导速度测量精度为  $0.1 \text{ m/s}$ , 在发射激光中心频率  $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$  处, 引起的多普勒频移  $\Delta\nu$  分别为  $0.0077 \text{ MHz}$  和  $0.0011 \text{ MHz}$ , 最终产生的  $\text{CO}_2$  浓度误差为  $0.0027 \text{ ppm}$  和  $0.0003 \text{ ppm}$ 。因此飞机速度和姿态不确定度引起的误差可忽略不计。

### 2.6 系统综合误差分析

由于激光雷达系统反演  $\text{CO}_2$  浓度相关的各误差项是独立不相关的,因此该系统测量  $\text{CO}_2$  浓度总误差为各主要误差项的均方根,如表 2 中所示。

由表 2 可以看出,水面反射率造成的误差即随机误差最大。如果增加累加脉冲次数,提高脉冲能量可以进一步降低该误差项。机载 IPDA 激光雷达  $\text{CO}_2$  浓度测量总误差约为  $0.71 \text{ ppm}$ , 满足  $1 \text{ ppm}$  的浓度测量精度要求。

表 2 系统总误差

Tab.2 Total error of system

Error source	Uncertainty	Relative error	Absolute error/ ppm
Temperature	1 K	0.000 7%	0.294 5
Pressure	100 Pa	0.000 3%	0.113 9
Water vapour	10%	0.000 4%	0.155 2
Frequency drift	0.3 MHz	0.000 3%	0.114 3
Reflectivity	$0.035 \text{ sr}^{-1}$	0.001 6%	0.599 6
Attitude angle	$0.01^\circ$	$7.11 \times 10^{-6}$	0.002 7
Total	—	0.001 7%	0.708 6

## 3 结 论

文中分析了机载差分吸收激光雷达测量  $\text{CO}_2$  柱线浓度的两种主要误差源,即相对系统误差和相对随机误差。理论分析了大气温度、压强和水汽不确定性误差,激光频率稳定性和飞机姿态速度测量不确定性产生误差等系统误差,以及不同地表反射率产生的随机误差,并且分析了这些误差项导致的  $\text{CO}_2$  柱线浓度反演误差。最后对各误差项做了总误差分析,结果表明,在  $\text{CO}_2$  平均浓度  $380 \text{ ppm}$  情况下,机载激光雷达  $\text{CO}_2$  柱线浓度综合测量误差约为  $0.71 \text{ ppm}$ , 满足  $1 \text{ ppm}$  的  $\text{CO}_2$  柱线浓度高精度测量需求。为进一步开展机载激光雷达测量  $\text{CO}_2$  浓度试验提供重要参考。

### 参考文献:

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] ESA A-SCOPE Mission Assessment Report, 2008 [R/OL]. [2013-08-30]. [http://esamultimedia.esa.int/docs/SP1313-1\\_ASCOPE.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/SP1313-1_ASCOPE.pdf).
- [3] Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, et al. Retrieval algorithm for  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  column abundance from short-wavelength infrared spectra observing satellite [J]. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 717-734.

- [4] Chu Jinkui, Wang Wei, Cui Yan, et al. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012(3): 520–526. (in Chinese) 褚金奎,王威,崔岩,等. 气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J]. *光学精密工程*, 2012(3): 520–526.
- [5] Mao J, Kawa S R. Sensitivity study for space –based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Appl Opt*, 2004, 43: 914–927.
- [6] Bi Yanmeng, Wang Qian, Wang Zhongdong, et al. Advances on space –based hyper spectral remote sensing for atmospheric CO<sub>2</sub> in near infrared band [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(5): 725–735. (in Chinese) 毕研盟,王倩,杨忠东,等. 星载近红外高光谱 CO<sub>2</sub> 遥感进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 725–735.
- [7] United States National Research Council. Earth science and applications from space: national imperatives for the next decade and beyond: 2007[EB/OL]. [2013–08–30]. <http://www.nap.edu/>.
- [8] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. Space –borne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis [J]. *Appl Phys*, 2008, 90: 593–608.
- [9] Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 21–27. (in Chinese) 华灯鑫,宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 21–27.
- [10] Liu Jiqiao, Xie Yangyi, Li Shiguang, et al. Research on spaceborne lidar for global atmospheric greenhouse gas detection[J]. *Infrared*, 2013, 34(2): 22–26. (in Chinese) 刘继桥,谢杨易,李世光,等. 用于全球大气温室气体探测的星载激光雷达研究[J]. *红外*, 2013, 34(2): 22–26
- [11] Xie Yangyi, Liu Jiqiao, Jiang Jiabin, et al. Wavelengths optimization to decrease error for a space –borne lidar measuring CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88–93. (in Chinese) 谢杨易,刘继桥,姜佳欣,等. 使 CO<sub>2</sub> 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.
- [12] Wang Min, Hu Shunxing, Fang Xin, et al. Variation characteristics of water vapor mixing ratio profile over Hefei [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (S): 156–161. (in Chinese)