

高光谱地基 CO₂ 太阳辐射计的定标

刘 强^{1,2} 宋茂新^{1,2} 陈迪虎^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心, 安徽 合肥 230031)
(² 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 介绍了一种用于大气 CO₂ 太阳吸收光谱地基观测的高光谱太阳辐射计, 包括仪器的设计结果及相对光谱辐射亮度的测量原理。以可调谐红外激光器加积分球作为定标光源, 详细介绍了波长、仪器线型函数的定标过程和方法。定标结果表明, 在仪器有效工作波段(1560~1575 nm)内, 光谱分辨能力为 0.097 nm, 杂散光水平在 0.5% 左右。定性比较了仪器的大气 CO₂ 太阳吸收光谱测量结果与 LBLRTN 软件的理论计算结果, 两者在吸收峰的位置、形状等方面都具有较好的吻合度。

关键词 遥感; 大气 CO₂ 观测; 高光谱; 太阳辐射计

中图分类号 O433.1; P414.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0228003

Calibration of High Spectral Resolution Solar Radiometer for Ground-Based Measurement of Atmospheric CO₂

Liu Qiang^{1,2} Song Maoxin^{1,2} Chen Dihu^{1,2}

¹ Center for Optical Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract High spectral resolution solar radiometer for ground-based measurement of atmosphere CO₂ absorption spectrum is suggested, including a brief introduction of instrument design, method of relative spectral radiance measuring, calibration of spectrum and instrument line shape (ILS). It is indicated that in the spectral band between 1560 nm and 1575 nm, the spectral resolution of instrument is 0.097 nm, and the relative intensity of stray light is about 0.5%. For instrument validating, CO₂ absorption spectrum of experiments are compared with those of theoretic calculation by LBLRTN software. Comparison shows that the relative intensity, wavelength position and shape of those two absorption spectrums are accordant.

Key words remote sensing; measurement of atmospheric CO₂; high spectral resolution; solar radiometer

OCIS codes 300.1030; 070.4790; 280.1120

1 引 言

大气温室气体是造成全球气候变暖的主要因素, 从而引发的各种极端天气会对人类活动造成巨大的影响^[1-3]。CO₂ 是气候变化研究中的重要大气温室气体^[4-5], 对 CO₂ 的空间分布探测已经引起了各主要工业国家、组织的重视。目前主要的在轨天基 CO₂ 观测卫星载荷有温空气体观测卫星(GOSAT)、

扫描成像大气吸收光谱仪(SCIAMACHY)等, 此外还有因首次发射失败而计划再度发射的轨道碳观测(OCO)卫星(OCO-2)^[4-8]。

地基观测可以对在轨遥感观测进行验证, CO₂ 的反演精度在一定程度上是依赖于观测仪器的光谱分辨能力的^[9-11], 与干涉型高分辨光谱仪器原理不同^[10,12], 此处介绍的 CO₂ 太阳光谱观测仪器是基于

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-10-10

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院知识创新工程青年人才领域前沿项目(Y03RC11123)

作者简介: 刘 强(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光学遥感光谱探测技术方面的研究。

E-mail: piglll@aiofm.ac.cn

光栅色散的高光谱太阳辐射计,仪器通过测量太阳辐射 CO₂ 吸收峰 1560~1575 nm 段的峰谷-基线相对光谱辐射比,来提供 CO₂ 的反演计算所需要的辐射参数。

本文简要介绍了高光谱太阳辐射计的 optical 设计以及相对光谱辐射的测量原理,给出了光谱波长定标及仪器线型函数定标的方法和定标结果,并将仪器的实际太阳吸收光谱观测结果与 LBLRTN 软件的理论计算结果作了初步的定性比较。

2 高光谱太阳辐射计

高光谱太阳辐射计的 optical 系统分为前置和色散两个结构,由前置 optical 系统收集太阳光辐射能量,通过光纤传导至色散 optical 系统,而后由色散 optical 系统完成光辐射的色散及接收探测。

图 1 是前置 optical 系统的光路示意图,该系统由物镜及场镜组成,当系统入瞳垂直于太阳直射光线时,在系统出瞳处,即光纤入射端就形成均匀的圆斑分布。图 2 是色散 optical 系统的光路示意图,该系统使用的是闪耀光栅色散方式,由于仪器的有效工作波段仅为 15 nm, optical 系统的色差并不严重,所以其准直、暗箱光路采用的是透射式的工作方式,可以较反射式光路获得更好的焦面弥散斑控制。

前置 optical 系统的设计全视场角为 1.5°,物镜 F

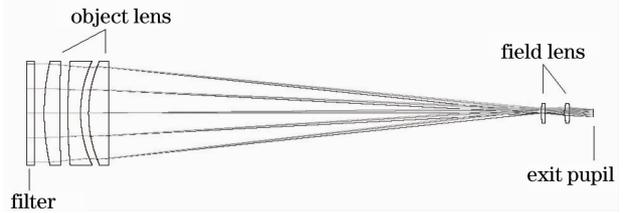


图 1 前置光学系统示意图

Fig. 1 Sketch of forward optical system

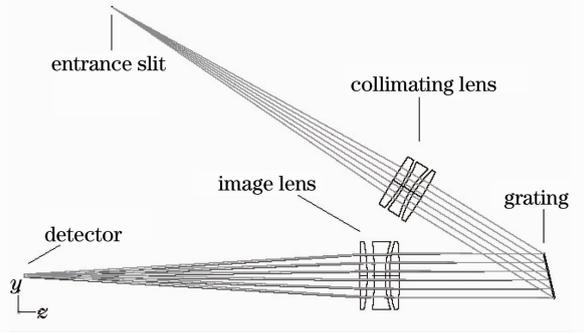


图 2 色散光学系统示意图

Fig. 2 Sketch of dispersive optical system

数为 4.77,色散系统的准直及暗箱镜组焦距为 820 mm,闪耀光栅的刻线密度为 600 line/mm,闪耀波长为 1500 nm。利用 Zemax 软件计算得到的探测器所处焦面位置点弥散斑大小如表 1 所示,其中 RMS 表示均方根。取仪器设计工作波段的波长上限(1560.00 nm)、中部(1567.50 nm)、下限(1575.00 nm)处的弥散斑分布情况进行比较。

表 1 不同波长处焦面点弥散斑比较

Table 1 Spot radius in focal plane with different wavelengths

Wavelength /nm	Spot RMS radius /mm	Diffraction limit RMS radius /mm	Rate of dispersion / (nm·mm ⁻¹)
1560.00	0.0133	0.00965	1.9794
1567.50	0.0011	0.00971	1.9764
1575.00	0.0961	0.00976	1.9739

当入射狭缝宽为 0.04 mm,焦面的采样间隔为 0.05 mm 时,计算得到仪器波段中部的光谱分辨能力约为 0.1 nm。

3 相对光谱辐射测量

为了计算大气中 CO₂ 的柱浓度分布,需要知道 CO₂ 吸收谱线带内的光谱透射率 $T(\sigma)$,其中 σ 是波数,其定义为地表太阳光谱辐射量与大气上界光谱辐射量的比值,如辐亮度比 $T_B(\sigma) = B(\sigma)/B_0(\sigma)$ 。大气上界的理论光谱辐射亮度 $B_0(\sigma)$ 可以通过 LBLRTN 软件计算得到,地表的实际太阳直射光谱辐射亮度 $B(\sigma)$ 就是仪器所要测量的物理量,此外,还可以通过 LBLRTN 软件计算得到某一时刻地表

的理论光谱辐射亮度 $B_s(\sigma)$ 来和实测结果进行比较。

由于前置 optical 系统的全视场角为 1.5°,大于太阳自身的发散角,太阳无法完全充满仪器的视场范围,而绝对定标过程中所使用的标准辐射源如漫射灯板、积分球等均能完全充满视场,因而会造成绝对定标系数的失效。因此,采用相对光谱辐射亮度来描述实际的测量结果,以消除实际测量时仪器视场未被充满所产生的影响。

在进行辐射测量时,进入前置 optical 系统入瞳的总光谱辐射通量为

$$\Phi_{\Sigma}(\sigma) = B(\sigma) \cdot S \cdot \Omega_{\text{sun}} + B_{\text{diff}}(\sigma) \cdot S \cdot \Omega_{\text{ins}}, \quad (1)$$

式中 S 是入瞳面积, Ω_{sun} 是太阳对仪器入瞳中心所张立体角, $B_{\text{diff}}(\sigma)$ 是天空漫射光谱辐亮度, Ω_{ns} 是仪器视场对应的立体角。由于 Ω_{sun} 与 Ω_{ns} 属同一数量级, 而 $B_{\text{diff}}(\sigma) \ll B(\sigma)$, 因此可以忽略天空漫射的影响。

相对光谱辐射亮度 $B^r(\sigma)$ 是光谱辐射亮度 $B(\sigma)$ 在光谱分布上进行归一化的结果, 即 $B^r(\sigma) = B(\sigma)/B(\sigma_0)$, σ_0 是某一固定波数, 如辐射亮度最大值处, 代入(1)式可得 $B^r(\sigma) = \Phi(\sigma)/\Phi(\sigma_0)$ 。进入仪器入瞳的光谱辐射通量 $\Phi(\sigma)$ 与探测器光电转换后的灰度值 (D_N, D_N) 值存在关系 $D_N(\sigma) = \Phi(\sigma) \cdot \eta(\sigma)$, 其中 $\eta(\sigma)$ 是系统的光谱响应系数, 包含了探测器的光谱响应系数、系统的光谱透过率、光栅光谱效率等一系列因素。最终可得到

$$B^r(\sigma) = \frac{D_N(\sigma)}{D_N(\sigma_0)} \cdot \frac{\eta(\sigma_0)}{\eta(\sigma)}. \quad (2)$$

定义 $R^r(\sigma) = \eta(\sigma_0)/\eta(\sigma)$ 为仪器的系统相对光谱响应系数, 该系数需要对系统进行相对辐射定标来得到。

4 仪器定标方法

CO₂ 太阳辐射计的定标工作主要分为三个部分, 即波长定标、仪器线型函数定标及相对辐射定标。波长定标建立探测器像素与光辐射波长(波数)之间的色散对应关系; 仪器线型函数(ILS)给出系统对单色辐射的响应函数, 描述了系统对单色光的光谱展宽程度; 相对辐射定标给出系统的相对光谱

响应系数 $R^r(\sigma)$ 。由于仪器的实际工作波段很窄, 认为探测器、光栅、滤光片等器件并不存在明显的光谱响应差别, 即近似认为系统的相对光谱响应系数 $R^r(\sigma) \equiv 1$, 这里将详细叙述仪器的波长定标及仪器线型函数定标。图 3 是定标光路示意图, 采用红外外步进式可调谐激光器作为标准谱源, 用带有旋转扰相板的积分球作为匀光器, 以消除激光散斑, 提高光源输出的稳定性, 减小仪器线型函数测量时的强度变化。

4.1 波长定标

从表 1 可以看到, 仪器存在微弱的色散非线性, 为了准确描述和分析像素与光辐射波长之间的关系, 采用二阶拟合来建立系统的色散关系, 即

$$\lambda(P) = A + B \cdot P + C \cdot P^2, \quad (3)$$

式中 P 是探测器的像素位置。测量时光源的频率步进间距为 0.05 THz(对应波长约 0.416 nm), 调谐频段为 189.90~191.10 THz(对应波段主 1578.686~1568.773 nm)。各调谐波长点的标准波长 $\lambda(P)$ 由激光器给出, 探测器响应的中心位置由各次测量结果采用高斯拟合得到, 表 2 为 Origin 软件的拟合结果, 图 4 是拟合曲线图。

表 2 波长定标拟合结果

Table 2 Polynomial fitting parameter of spectral calibration

	A /nm	B /nm	C /nm
Value	1554.73	0.09979	-3.5896×10^{-6}
Error	0.04574	0.00049	1.2619×10^{-6}

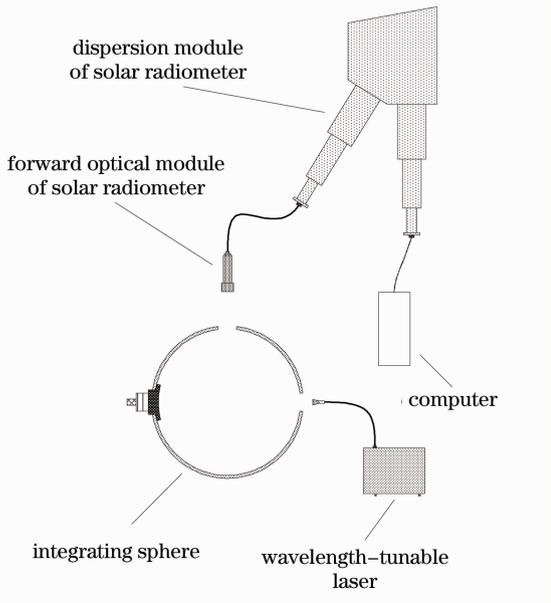


图 3 太阳辐射计定标光路示意图

Fig. 3 Instruments sketch of calibration to solar radiometer

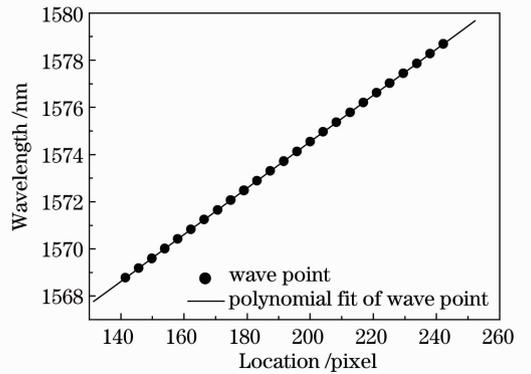


图 4 波长定标拟合波长与像素位置的关系曲线

Fig. 4 Fitting curve of wavelength versus location of pixel

由(3)式的微分可得到 $d\lambda = B \cdot dP + 2C \cdot P \cdot dP$, 拟合偏差 dP 对波长偏差 $d\lambda$ 的影响系数分别是 B 与 $2C \cdot P$, B 为 0.0998 nm, $2C \cdot P$ 最大值为 0.0092 nm (当像素数为最大值 256 pixel 时)。可以看出, 系统的色散非线性影响非常小, 同样的拟合偏差下, 由于非线性色散带来的影响仅为线性偏差的 1/10 左右,

在仪器的实际使用时仅考虑线性色散拟合即可。此外,当像素的拟合误差在亚像素级,即 $dP=0.1$ 时,引起的波长定标偏差约为 0.01 nm ,只要在波长定标过程中将谱源的波长尽量地平均分布在整个波段上,所产生的累积误差是不会对仪器使用造成太大影响的。

4.2 仪器线型函数

由于焦面的光谱采样间隔与仪器的光谱分辨能力量级相当,系统的单色光响应函数仅有 $3\sim 4$ 个有效采样数据,这对于精确描述系统的光谱分辨能力是欠缺的。仪器线型函数的建立实际上就是将系统对单色光响应进行加密采样的过程:当谱源的中心波长有一微小移动时,认为系统的光谱响应函数形状不变,但响应峰值的移动会使得采样数据发生强度变化。将其拟合后求出峰值点的光谱位置及强度,并将实际采样点的波长位置和强度对其进行归一化处理。不断增大谱源的中心波长偏移,就可以得到一系列经过波长及强度归一化的实际采样点,通过拟合即可准确构建出系统对单色光的响应函数,即仪器线型函数。

对于光栅色散型光谱仪器而言,仪器线型函数描述的是单色物点在经过光学系统后,能量在色散方向上的空间分布,即单色展宽。理想的光学系统

不存在单色展宽,其线型函数是完美的脉冲函数;但实际的光学系统,却会受到狭缝、衍射孔径、几何像差等因素的干扰。在焦面装调完成后,对线型函数影响最大的因素是狭缝的空间展宽及光学器件的衍射展宽,忽略几何像差的情况下,线型函数的变化可以认为是狭缝空间分布函数与系统衍射极限分布函数的卷积。卷积后的线型函数在形式上近似于高斯函数,因而采用高斯拟合作为线型函数评价时使用的基本拟合方法。

测量时光源的频率步进间距为 0.0008 THz (对应波长约 0.0066 nm),分别在三个波段区间: $1569.5940\sim 1569.6926\text{ nm}$ 、 $1572.4755\sim 1572.5745\text{ nm}$ 、 $1574.9538\sim 1575.0531\text{ nm}$ 进行了仪器的线型函数测量。标准高斯函数为

$$y = y_0 + \frac{A_0}{w} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-2 \cdot \frac{(x - x_c)^2}{w^2}\right], \quad (4)$$

式中 w 参数描述了高斯曲线的形状, $1.1778w$ 就是线型函数的半峰全宽,等效于仪器的分辨能力。这里 y_0 描述相对强度的平均本底大小, A_0 为函数的归一化参数,无实际意义, x_c 描述拟合中心的偏离。图 5 是线型函数的拟合曲线。

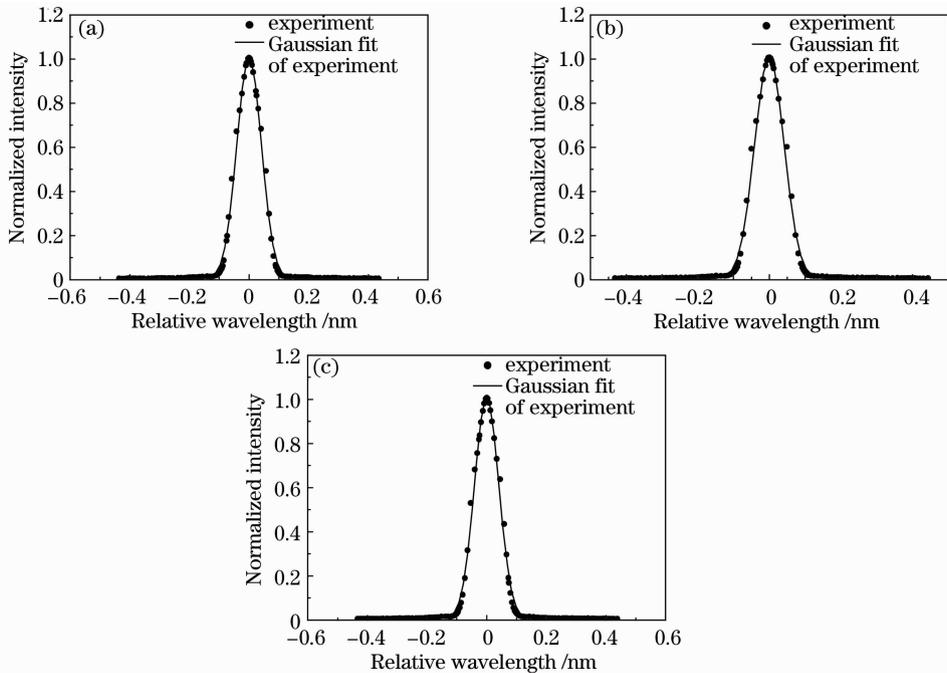


图 5 不同波段仪器型函数的高斯拟合曲线。(a) $1569.5940\sim 1569.6926\text{ nm}$; (b) $1572.4755\sim 1572.5745\text{ nm}$;
(c) $1574.9538\sim 1575.0531\text{ nm}$

Fig. 5 Gaussian fitting curves of ILS. (a) $1569.5940\sim 1569.6926\text{ nm}$; (b) $1572.4755\sim 1572.5745\text{ nm}$;
(c) $1574.9538\sim 1575.0531\text{ nm}$

可以看到,实际的分辨能力结果与理论设计值略有出入,相对变化在 1%~2%之间,其原因可能是由于光机结构装调等工程性原因造成的实际成像镜组焦距略大,导致系统的线色散增加;同时狭缝的宽度略低于设计值,使得弥散斑对分辨能力的影响

降低,从而整机的光谱分辨能力略有增加。

表 3 给出了线型函数的拟合结果。从结果上看,仪器的杂散光水平在 0.5%左右,而拟合中心的偏离不超过 10^{-4} 量级。

表 3 线型函数拟合结果

Table 3 Gaussian fitting parameter of ILS

Wavelength /nm	Results of fitting				
	y_0	x_c/nm	A_0	w/nm	FWHM /nm
1569.5940~1569.6926	0.0052	1.2×10^{-4}	0.1041	0.0824	0.0971
1572.4755~1572.5745	0.0044	4.7×10^{-5}	0.1043	0.0827	0.0974
1574.9538~1575.0531	0.0049	-1.0×10^{-5}	0.1032	0.0819	0.0965

5 实验结果对比

CO₂ 太阳辐射计于 2013 年 6 月 6 日进行了太阳直射相对光谱辐射亮度的测量,测量地点为合肥市,实测的 CO₂ 太阳吸收光谱分布如图 6 所示。测量数据进行了波长-波数校正后转换到波数表示,并与 LBLRTN 软件给出的理论 CO₂ 太阳吸收光谱相对辐射亮度进行了对比,如图 7 所示。

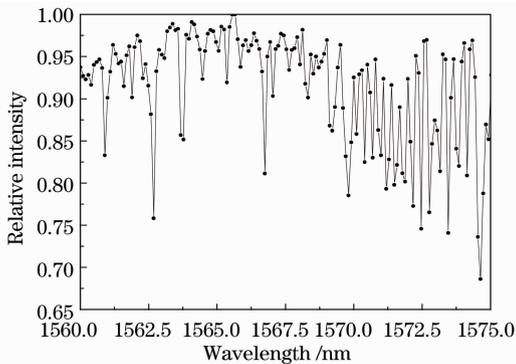


图 6 相对光谱辐射亮度室外测量结果

Fig. 6 Experimental results of relative spectral radiation measuring

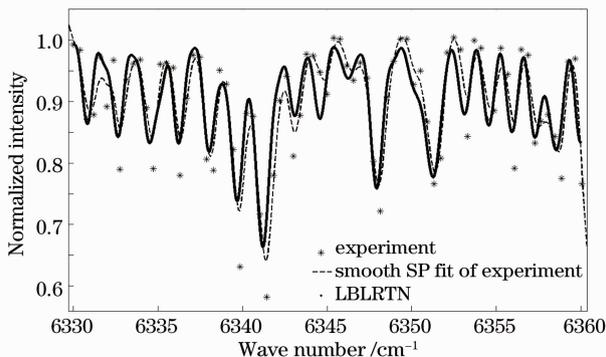


图 7 相对光谱辐射亮度测量结果对比

Fig. 7 Contrast of results between experiment and LBLRTN

实测数据点是离散化的,通过样条插值的方式可以得到平滑的拟合曲线。从图 7 中可以看到,实测 CO₂ 太阳吸收光谱辐射亮度曲线与理论 CO₂ 太阳吸收光谱辐射亮度曲线之间在吸收峰强度、形状、位置等方面都具有较好的吻合度,但仍然存在个别峰强度差别的现象,其原因一方面可能是在系统光谱响应系数上存在一定的不一致性,另一方面可能是测量时的天气状况造成的;另外峰值波长在某些位置有较小的偏移,应是波长定标累积误差造成的。

6 结 论

介绍了一种基于光栅色散工作方式的、用于大气 CO₂ 太阳吸收光谱地基观测的高光谱太阳辐射计,包括了观测仪器简介、仪器测量原理、仪器定标及实验结果对比。为了解绝对定标系数在太阳直射测量中由于系统视场角未充满而产生的失效问题,高光谱 CO₂ 太阳辐射计采用的是相对光谱辐射亮度的测量方式。使用仪器线型函数的定标方法准确地给出了仪器的分辨率以及仪器对单色光的展宽程度,从而为建立与之相吻合的大气辐射传输模型提供了重要的参数依据。定性的实验结果对比表明,该仪器测量所获得的亚纳米级分辨率 CO₂ 太阳相对吸收光谱与理论值具有较好的吻合度,这也验证了仪器线型函数作为高光谱分辨率定标方法的优越性。但实测的光谱曲线在个别位置的基线仍然与理论值具有一定的差别,由于前期工作中将系统的相对光谱响应系数近似认为是一致的,这会引入相对光谱强度测量的偏差,从而导致吸收峰深度及基线深度发生变化,这部分工作需要通过进一步的相对辐射定标和室外实验对比来进行解决和验证。

参 考 文 献

- 1 Feng Lin, Hu Shunxing, Huang Jian, *et al.*. A new method for atmospheric CO₂ balloonsonde measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100103.
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): 100103.
- 2 Huang Ronghui. An Introduction to Atmospheric Science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. 116.
黄荣辉. 大气科学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2005. 116.
- 3 Ma Xin, Lin Hong, Ma Yingying, *et al.*. Atmospheric pressure broadening correction algorithm of differential absorption atmospheric CO₂ lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101003.
马昕, 林宏, 马盈盈, 等. 差分吸收大气CO₂激光雷达的大气压力增宽修正算法[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101003.
- 4 Liu Yi, Lü Daren, Chen Hongbin, *et al.*. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO₂ [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2): 247-254.
刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 卫星遥感大气CO₂的技术与方法进展综述[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(2): 247-254.
- 5 Shi Guangyu, Dai Tie, Xu Na. Latest progresss of the study of atmospheric CO₂ concentration retrievals from satellite [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(1): 7-13.
石广玉, 戴铁, 徐娜. 卫星遥感探测大气CO₂浓度研究最新进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(1): 7-13.
- 6 Li Honglin, Zhang Chunhua, Wang Weihua. Configuration setting of instruments on greenhouse gases observing satellite (GOSAT) and orbiting carbon observatory (OCO) [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2011, 39(5): 603-607.
李红林, 张春华, 王伟华. 新一代温室气体观测卫星(GOSAT、OCO)传感器设置[J]. *气象科技*, 2011, 39(5): 603-607.
- 7 Zheng Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *China Optics*, 2011, 4(6): 546-561.
郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 546-561.
- 8 D Crisp, R M Atlas, F M Breon, *et al.*. The orbiting carbon observatory (OCO) mission [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(4): 700-709.
- 9 Ye Hanhan, Wang Xianhua, Wu Jun, *et al.*. Sensitivity for retrieval of atmospheric column carbon dioxide with high accuracy [J]. *J Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(3): 209-214.
叶函函, 王先华, 吴军, 等. 二氧化碳浓度高精度反演的敏感性研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2011, 6(3): 209-214.
- 10 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.*. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528002.
施海亮, 方勇华, 吴军, 等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528002.
- 11 Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua, *et al.*. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO₂ detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0101001.
吴军, 王先华, 方勇华, 等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0101001.
- 12 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun, *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1511-1515.
熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1511-1515.

栏目编辑: 何卓铭