基于 SCIATRAN 模型的大气 CO_2 敏感性分析

叶 松[1,2],甘永莹[1,2*],熊 伟[3],王新强[1,2],汪杰君[1,2],张文涛[1,2],王方原[1,2]

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院,广西 桂林 541004;
2. 广西光电信息处理重点实验室,广西 桂林 541004;
3. 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: SCIATRAN 是一种高光谱分辨率辐射传输模型,其参数丰富、调节性强,为反演 CO_2 浓度提供更可靠的仿真资料。研究采用 SCIATRAN 模型模拟了不同气溶胶类型、气溶胶光学厚度以及地表类型的 CO_2 辐射亮度,分析了不同条件下影响 CO_2 辐射亮度的规律。研究结果表明:气溶胶类型对 CO_2 辐射亮度的影响比例在 8%以内。由于城市型气溶胶成分复杂,对 CO_2 辐射亮度的影响比乡村型和海洋型气溶胶稍大;气溶胶光学厚度对 CO_2 辐射亮度的影响比例在-3.52%~42.97%之间,光学厚度越小,CO_2 辐射亮度则越大;地表类型对 CO_2 辐射亮度影响最大,与参考值差值比例最高达 166.43%,且 CO_2 辐射亮度随地表反照率的增强而增强。该研究还通过仿真信号与实测信号的对比,验证了 SCIATRAN 模型仿真信号的有效性和可行性。

关键词: SCIATRAN 模型; 地表反照率; 气溶胶类型; 气溶胶光学厚度

中图分类号: O433.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0717006

Sensitivity analysis of carbon dioxide based on SCIATRAN

Ye Song[1,2], Gan Yongying[1,2*], Xiong Wei[3], Wang Xinqiang[1,2], Wang Jiejun[1,2], Zhang Wentao[1,2], Wang Fangyuan[1,2]

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, China;
3. Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;)

Abstract: SCIATRAN, providing more reliable simulation data for retrieval of CO_2 concentration, is a high spectral resolution radiative transfer model with rich parameters and easily calibrated. In this article, SCIATRAN was used to simulate the CO_2 radiation intensity of different aerosol types, aerosol optical thickness and surface types, and the regularity of influence of CO_2 radiation intensity under different conditions was analyzed. The results show that: first the influence ratio of aerosol type on CO_2 radiation intensity is less than 8%, because the urban aerosol has complex composition, the effect on CO_2 radiation intensity is slightly larger than that of country type and ocean type aerosol; then, the influence of aerosol optical thickness on CO_2 radiation intensity is −3.52%−+42.97%, and the smaller the optical thickness,

收稿日期: 2018-02-05; **修订日期:** 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41561079,41201342);广西自然科学基金(2013GXNSFAA019328);广西教育厅项目(KY2015YB108);广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ17108,YQ15111);桂林电子科技大学创新团队项目

作者简介: 叶松(1979-),男,研究员,博士,主要从事光学遥感方面的研究。Email:yesongmail@sina.com

通讯作者: 甘永莹(1990-),女,硕士,主要从事高光谱遥感等方面的研究。Email:sugargan@163.com

the greater the radiation intensity; Last, the surface types have the greatest influence on the CO_2 radiation intensity, and the difference between the result and the reference value is up to 166.43%. The CO_2 radiation intensity increases when the surface albedo increases. This article also verifies the feasibility and effectiveness of the simulation signal based on SCIATRAN by comparing its analog signal to the measured signal.

Key words: SCIATRAN model; surface albedo; aerosol type; aerosol optical thickness

0 引 言

CO_2 的过量排放被认为是全球变暖的主要原因,因此实现 CO_2 浓度高精度探测,对未来全球变暖趋势和气候变化的预测至关重要[1]。大气正演模型为准确反演 CO_2 浓度提供了可靠的仿真资料,也对新的探测器性能模拟和传感器系统参数优化有着重要的意义[2]。常见的辐射传输模型有 LOWTRAN 和 MODTRAN,以及在 GOMETRAN+基础上研发的 SCIATRAN。其中 SCIATRAN 被多次证明为星载传感器 SCIAMACHY 的多种观测方式的痕量气体探测提供了可靠稳定的数据[3-5]。在此,文中将以 SCIATRAN 为正演模型模拟大气辐射传输,在标准大气压强和温度下,不考虑云层影响,仿真并讨论大气气溶胶类型、气溶胶光学厚度以及地表反照率对仪器接收 CO_2 辐射亮度的影响[6-7]。

1 SCIATRAN 正演模型

文中采用的 SCIATRAN 正演模型包含了辐射传输模型和反演算法,光谱范围为175.44 nm~40 μm,最小光谱分辨率为 0.24 nm[8-9]。SCIATRAN 辐射传输模型包括球形大气、伪球形大气和平行大气三种大气模式。在这三种大气模式下,SCIATRAN 均提供了丰富而细致的参数,例如观测几何、云参数、气溶胶参数、痕量气体参数以及地表特性参数等。在总控文件 control.inp 下根据实际仿真需求设置参数,并在对应的子文件下进行更细致的设置。在该研究中,除地表反照率与气溶胶参数外,其余主要背景参数均按表 1 设置。其中计算结果 RTM Mode 为辐射亮度Int,辐射传输类型 RTM_TYPE 为球型大气 Spher_scat,辐射传输方程求解用离散坐标法 DOM_S,太阳辐射通量为 Solspec_modtran37.dat,利用逐线积分 LBL 研究痕量气体 CO_2,研究地区为东经 117.17°、北纬 31.91°,即合肥地区。

表 1 参数设置

Tab.1 Parameter settings

Parameter	Setting
RTM Mode	Int
RTM_TYPE	Spher_scat
RTM-CORE	DOM_S
Extra-terrestrial solar flux	Solspec_modtran37.dat
Trace gas selection	CO_2(t)
Line absorber treatment	Lbl
Do cloud	F
Latitude & Longitude	31.91,117.17

2 仿真结果与敏感性分析

2.1 痕量气体对 CO_2 探测的影响

虽然近红外遥感探测对地表的 CO_2 浓度敏感,但在整个近红外波段中,大气的主要痕量气体如水汽、臭氧、甲烷等均呈现出不同的吸收强度,如图 1 所示。从图中看出:水汽在整个近红外波段都有较大范围的吸收,而甲烷在个别波段也有较强的吸收,因此恰当的探测波段,是准确获取 CO_2 浓度信息的关键。从图 1 中还可看出:CO_2 的主要吸收带有 1.6、2.0、2.7、4.3、12~18 μm,其中波段 2.7、4.3、12~18 μm 出现了 CO_2 吸收饱和的现象,无法用于大气 CO_2 探测。而 1.6、2.0 μm 为 CO_2 的弱吸收带,经过对比发现位于 1.6 μm 波段,CO_2 的吸收强度适中,且 O_3、CH_4 以及 H_2O 在该波段不形成光谱吸收带,对比结果如图2 所示,因此在该仿真波段 O_3、CH_4 和 H_2O 对二氧化碳探测均无影响。在实际应用中该波段的探测灵敏度较高,是 CO_2 的不饱和吸收带,权重函数

峰值主要分布在近地面，在 CO_2 反演中具有重要地位[10-11]。此外，文中所采用的实测数据处于 1.568~1.583 μm，数据由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气二氧化碳空间外差光谱仪外场试验得到[12]，因此文中仿真的最佳波段为 1.568~1.583 μm。以下仿真将在 1.568~1.583 μm 波段进行。

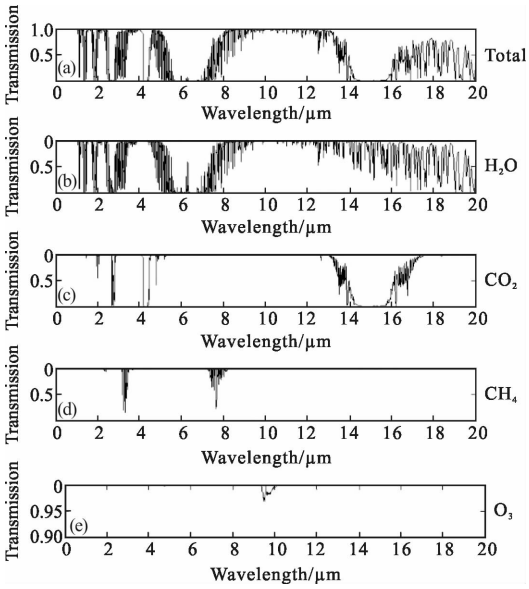


图 1 大气吸收谱图

Fig.1 Atmospheric absorption spectrum

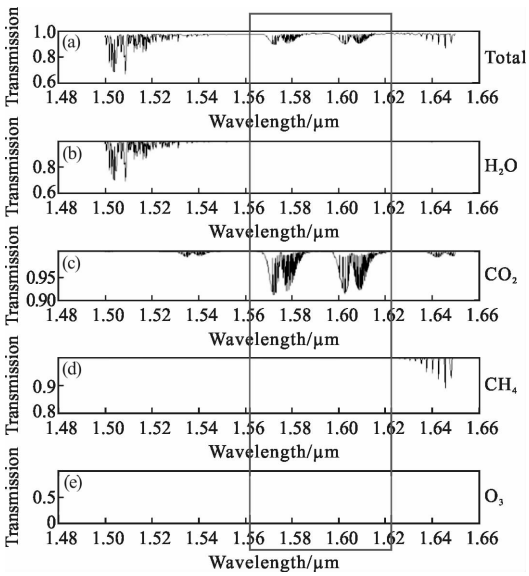


图 2 1.6 μm 吸收带的大气吸收谱

Fig.2 Atmospheric absorption spectrum of 1.6 μm absorption band

2.2 气溶胶对 CO_2 探测的影响

2.2.1 气溶胶类型

气溶胶作为大气重要的组成部分，在大气辐射传输的过程中具有重要地位，是 CO_2 辐射亮度探测的影响因素之一。由于气溶胶的成分来源不同，使得各地区的气溶胶类型也不同，在 SCIATRAN 模型中，气溶胶类型分为城市型、乡村型和海洋型，表 2 为各气溶胶类型的光学特性因子。在研究中默认季节为春夏季，大气层各层的能见度和湿度分别为 23 km 和 80%，地表类型为壤土，对不同气溶胶类型的仿真结果如图 3 所示。

表 2 气溶胶的光学特性因子

Tab.2 Optical properties of aerosols

Aerosol type	AOT	Asymmetric factor	Single scattering albedo
Urban	0.089	0.682	0.946
Rural	0.080	0.670	0.952
Maritime	0.236	0.787	0.956

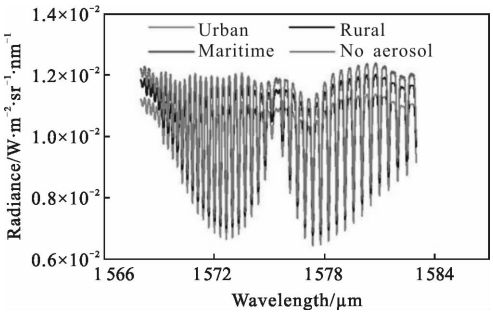


图 3 不同气溶胶类型的对比结果

Fig.3 Comparison of different aerosol types

结果显示这三种气溶胶类型对 CO_2 辐射亮度的影响都在同一数量级，其中海洋型气溶胶下 CO_2 辐射亮度值最大，城市型最小。这是由于海洋型气溶胶成分相对单一，分子大小均匀，而城市型气溶胶成分相对复杂，大小不一，因此，城市型气溶胶对太阳辐射的散射能力较海洋型强。与不考虑气溶胶的情形对比，结果显示海洋型气溶胶与不考虑气溶胶的模拟结果最为相近，辐射亮度差值比例为-0.42%，而城市型和乡村型气溶胶仿真结果与不考虑气溶胶情形的仿真结果差值比例分别为-7.9%和-2.8%。

2.2.2 气溶胶光学厚度

气溶胶光学厚度(AOT)是气溶胶光学属性之一，定义为介质的消光系数在垂直方向上的积分，反映了气溶胶对太阳辐射的衰减作用。气溶胶光学厚度与水平能见度的转换关系如公式(1)所示。

$$x=\frac{3.912}{\beta_e} \tag{1}$$

式中：x 为能见度；β_e 为消光系数，根据上式可将气溶胶光学厚度转换为水平能见度，从公式(1)看出气溶胶边界层能见度与气溶胶光学厚度成反比，能见度越大，则光学厚度越小。在表 1 设置的基础上，进一步分析气溶胶光学厚度对探测器接收到的 CO_2 辐射亮度的影响。以城市型气溶胶为例，分别模拟气溶胶边界层能见度为 2、5、10、23、50 km 下的 CO_2 辐射亮度。

从图 4 可以看出，在城市型气溶胶下，探测器接收到的 CO_2 辐射亮度随着边界层能见度的增大而增大。根据公式(1)，边界层能见度越大，则消光系数越小，即气溶胶对太阳辐射的衰减作用越小，因此，探测器接收到的 CO_2 辐射亮度越大。以不考虑气溶胶情形的模拟结果为参考值，计算不同能见度模拟结果与参考值辐射亮度差值比例，如图 5 所示。从对比结果中看出，10 km 以内的能见度变化对探测器接收到的 CO_2 辐射亮度影响显著，大于 10 km 的能见度变化影响趋于平缓。由此说明，在 CO_2 探测的过程中，低能见度更容易使探测结果产生偏差。

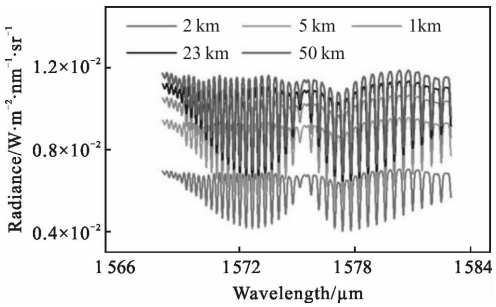


图 4 不同能见度的模拟结果

Fig.4 Simulation results with different visibilities

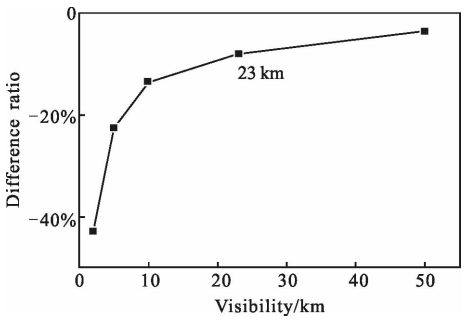


图 5 不同能见度的对比结果

Fig.5 Comparison of different visibilities

2.3 地表反照率对 CO_2 辐射亮度的影响

在辐射传输过程中，假设大气顶部太阳辐射为 E_0，地表反照率为 ρ，根据 Beer-Lambert 定律，探测器接收到的辐射亮度 L 可以用下式表示：

$$L=\rho\frac{E_0\cos\theta'}{\pi}e^{-m\tau} \tag{2}$$

式中：θ' 为太阳天顶角；τ 为斜程路径上的光学厚度；m 为对应路径的大气质量分子。由此可见，地表作为辐射传输过程的重要介质，对 CO_2 遥感探测的影响至关重要。公式(2)将地球表面视为朗伯体表面，即太阳辐射的反射亮度不随观测角度的变化而变化。而实际上，自然界中产生方向反射的物体占大多数，当遥感应用进入到定量分析阶段时，应将目标物视为非朗伯体，由此引入了双向反射分布函数(BRDF)。文中针对地表覆盖类型为海洋(Ocean)、云杉(Spruce)、草地(Grasses)、阔叶林(Leaf forest)、灌溉小麦(Irrigated wheat)以及雪地(Snow)等典型地表进行仿真，并以地表类型为壤土(Loam soil)的仿真结果作为参考值，进行比较分析，其结果如图 6 所示。

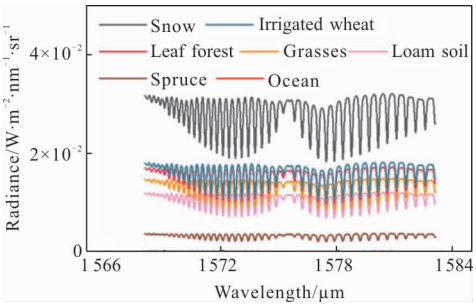


图 6 不同地表类型的模拟结果

Fig.6 Simulation results for different surface types

从仿真结果图 6 中看出：不同地表类型的仿真结果随着波长变化的趋势是一致的，但是仪器接收到的 CO_2 辐射亮度并不相同，这是由于不同的地表类型具有不同的反照率，即地表对太阳辐射的反射能力不同。以壤土地表仿真结果为参考值，各个地表类型的仿真结果与参考值的对比如图 7 所示，结果显示：反照率越大，仪器接受到的 CO_2 辐射亮度越大，差值比例近似线性直线。其中雪地的反照率最大，其仿真结果与壤土的仿真结果差值比例高达 166.43%。而与壤土地表反照率差异最小的草地地表，其差值比例也达到了 23.61%。说明在该波段，不同的地表类型将对 CO_2 浓度探测带来巨大的偏差。

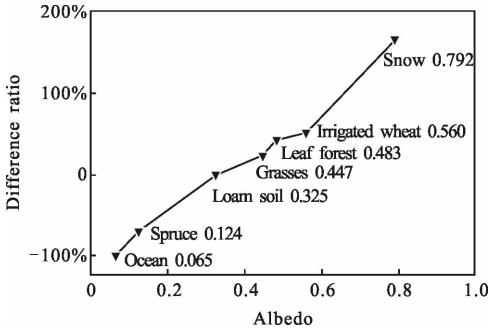
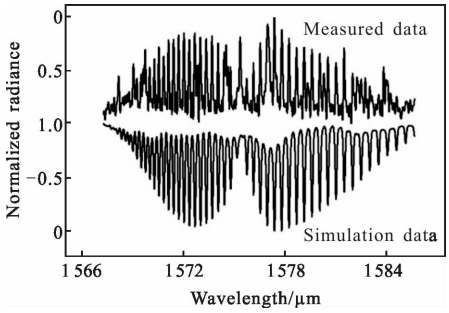


图 7 不同地表类型的对比结果

Fig.7 Comparison of different surface types

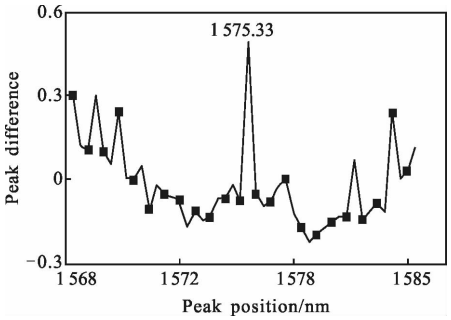
2.4 仿真数据与实测数据的对比

为验证以上仿真的有效性，现将仿真数据与安徽光学精密机械研究所研制的大气二氧化碳空间外差光谱仪外场实验数据进行归一化处理，并对比分析，结果如图 8 所示。



(a) 形状对比

(a) Shape comparison



(b) 峰值对比

(b) Peak comparison

图 8 模拟信号与实测信号对比结果

Fig.8 Comparison with measured signal and analog signal

由于试验外场处于合肥地区，因此仿真数据是由地表类型为壤土、气溶胶类型为城市型、大气层能见度为 23 km 的仿真结果得到。从图 8(a)可以看出：模拟数据与实测数据随波长变化的趋势相同，整体的光谱形状一致。提取模拟数据与实测数据对应的各个峰值进行比较，计算两者的差值，得到曲线图8(b)。峰值的大小代表了大气中 CO_2 对该波段太阳辐射的吸收强度，图中大部分峰值的偏差均在 0.2 以内，说明 SCIATRAN 模型的有效性。而造成这些偏差是由于实测数据与模拟数据的环境因素存在差异，即气溶胶参数、地表参数的偏差。由于 SCIATRAN 模型对中国地区的地表类型数据有限，以及大气环境的复杂性，使得这些偏差在一定范围内存在是合理的，进一步证明了这些敏感性因子对 CO_2 探测的影响。对比结果中还显示在波长约为 1 575.33 nm 处出现一个差值峰，结合图 8(a)发现，该峰值出现在实测数据中，推测该峰值是由仪器噪声所造成，这种误差正是在反演算法中应给予纠正的问题。

3 结 论

对大气 CO_2 进行高精度探测过程中，易受大气痕量气体、大气气溶胶以及地表类型等因素的影响，笔者对这些影响因素进行了分析和比较。结果表明：大气中的 H_2O、O_3 和 CH_4 在 1.568~1.583 μm 波段无明显吸收带，因此对 CO_2 探测的影响可忽略不计。由于不同气溶胶类型太阳辐射的散射能力不同，使得探测器探测到的 CO_2 辐射亮度存在差异，但这些差异仅在 8%以内。而在气溶胶光学厚度较大时，探测器接收的 CO_2 辐射亮度变化明显，与参考值差值比例最大超过 40%。除此之外，探测器接收到的 CO_2 辐射亮度值还随地表反照率的增大而增大，且地表类型对 CO_2 探测的影响远大于气溶胶类型和气溶胶光学厚度。从仿真信号与实测信号的比较中也验证了以上因子对 CO_2 探测的影响，以及 SCIATRAN 模型作为 CO_2 高精度探测正演模型的有效性。由此可见，建立完整和高精度的正演模型是准确反演 CO_2 浓度的关键。因此，在后续的工作中应继续研究其他大气因素的影响以及探测器的实际仪器函数的影响。

参考文献：

[1] Shi Hailing, Xiong Wei, Luo Haiyan, et al. Novel hyper-spectral technology for atmospheric carbon dioxide detection [J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2013, 40(8): 36-41. (in Chinese)

施海亮, 熊伟, 罗海燕, 等. 新型超光谱大气 CO_2 遥感探测技术[J]. 光电工程, 2013, 40(8): 36-41.

[2] Li Y, Zhang C, Liu D, et al. CO_2 retrieval model and analysis in short-wave infrared spectrum [J]. ***Optik-International Journal for Light and Electron Optics***, 2016, 127(10): 4422-4425.

[3] Eichmann K U, Leventiduo E, Heue K P, et al. Tropical upper tropospheric ozone volume mixing ratios retrieved with the cloud slicing method using SCIATRAN/GOME2 data: methodology, ozone sonde comparisons, and verification of the new S-5P operational processor[C]// ESA Living Planet Symposium, 2016.

[4] Li Y, Zhang C, Wang D, et al. Comparison between the ESFT method and LBL method of CO_2 retrieval for high-resolution satellite [C]//The International Conference on Photonics and Optical Engineering and the West China Photonics Conference. International Society for Optics and Photonics, 2015.

[5] Liu D, Zhang C, Li Y, et al. The influence of temperature on the simulated high resolution spectra of enhanced SCIATRAN model in near infrared band [J]. ***Optik-International Journal for Light and Electron Optics***, 2016, 127(18): 7292-7299.

[6] Xu Mengchun, Xu Qingshan. Effect of aerosol particle characteristic and vertical distribution on radiation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45 (2): 0211002. (in Chinese)
徐梦春, 徐青山. 气溶胶粒子特性和垂直分布对辐射的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0211002.

[7] Karsisto P, Fortelius C, Demuzere M, et al. Seasonal surface urban energy balance and wintertime stability simulated using three land-surface models in the high-latitude city Helsinki [J]. ***Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society***, 2016, 142(694): 401-417.

[8] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, et al. SCIATRAN 2.0 -A new radiative transfer model for geophysical applications in the 175-2 400 nm spectral region [J]. ***Advances in Space Research***, 2005, 36(5): 1015-1019.

[9] Rozanov V V, Rozanov A V, Kokhanovsky A A, et al. Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean: Software package SCIATRAN [J]. ***Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer***, 2014, 133(2): 13-71.

[10] Ye Hanhan, Wang Xianhua, Wu Jun, et al. Sensitivity of retrieval of atmospheric column carbon dioxide with high accuracy [J]. ***Journal of Atmospheric and Environmental Optics***, 2011, 6(3): 208-214. (in Chinese)
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): 208-214.

[11] Wu Jun. Research on radiative transfer characteristics and retrieval methods for atmospheric CO_2 monitoring [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
吴军. 大气 CO_2 辐射传输特性与反演方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.

[12] Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua, et al. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO_2 detection[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2011, 31(1): 0101001. (in Chinese)
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.