

中红外光谱特性分析及中高层¹³CO₂反演条件研究吴时超^{1,2}, 王先华^{1*}, 叶函函¹, 李超^{1,2}, 安源^{1,2}, 王晓迪^{1,2}¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 利用辐射传输模型(SCIATRAN)联合高分辨透射率谱线(HITRAN)库对包含¹³CO₂强吸收特征的中红外光谱进行特性分析,发现中红外相比于近红外与热红外波段,¹³CO₂的吸收特征更为明显,并且中红外波段对对流层5~15 km处的二氧化碳浓度变化极为敏感。大气的对流与交换使得中高层CO₂的浓度变化与近地表息息相关。通过对光谱特性的分析,得出影响二氧化碳反演的主要因素是水汽、温度和氧化亚氮。在进一步研究利用卫星遥感数据反演得到的¹³CO₂浓度时,给出了反演的必要条件,其中水汽廓线需满足 50×10^{-6} 的精度,温度廓线需要满足高于0.03 K的精度,氧化亚氮廓线需要高于 5×10^{-9} 的精度,仪器的信噪比需要高于600。该结论为利用卫星遥感探测¹³CO₂提供了理论基础,并为未来的超光谱探测器制造指标提出了要求,可以更好掌控CO₂“源”与“汇”及输送规律,了解全球碳循环收支。

关键词 大气光学; 中红外波段; ¹³CO₂; 反演

中图分类号 P407

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1101003

Analysis of Mid-Infrared Spectroscopy and Research on Retrieval Conditions of ¹³CO₂Wu Shichao^{1,2}, Wang Xianhua^{1*}, Ye Hanhan¹, Li Chao^{1,2}, An Yuan^{1,2}, Wang Xiaodi^{1,2}¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In this paper, we analyzed the characteristics of the mid-infrared spectra containing the ¹³CO₂ strong absorption with a transmission model of scanning imaging absorption (SCIATRAN) and a high-resolution transmission molecular absorption database (HITRAN). We found that the ¹³CO₂ absorption was more obvious in the mid-infrared band than in the near-infrared and thermal infrared bands; the mid-infrared band was extremely sensitive to changes in the CO₂ concentration in the 5–15 km middle and upper troposphere. Atmospheric convection and exchange make the change in the CO₂ concentration in the middle and upper layers closely related to the near-surface. The analysis of the spectral characteristics indicates that the main factors affecting CO₂ retrieval are water vapor, temperature, and nitrous oxide. Furthermore, we retrieved the ¹³CO₂ concentration with satellite remote sensing data and provided the necessary conditions for retrieval. Specifically, the profiles of water vapor, temperature, and nitrous oxide should respectively have the precision of 50×10^{-6} , above 0.03 K, and above 5×10^{-9} ; the signal-to-noise ratio of the instruments needs to be higher than 600. Our findings provide a theoretical basis for ¹³CO₂ detection with satellite remote sensing and put forward requirements for indicators for future hyperspectral detector manufacturing. As such, we can better control the CO₂ source, sink, and transmission laws and grasp the global carbon cycle budget.

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-01-05; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB050400, 2017YFB0504001)、中国科学院合肥物质科学研究院“十三五”规划重点支持项目(Y73H9P1801)、民用航天技术预先研究项目

* E-mail: xhwang@aiofm.ac.cn

Key words atmospheric optics; mid-infrared band; $^{13}\text{CO}_2$; retrieval

OCIS codes 010.1320; 010.1120; 300.6340

1 引言

CO_2 是引起全球温度升高的主要原因,然而 CO_2 与人类活动、自然环境排放的关系,仍然是一个需要探究和确定的问题,它决定着人类对未来发展的规划。人类活动是导致二氧化碳浓度不断攀升的直接原因,区分二氧化碳的人为与自然排放源是量化研究碳排放的关键。自然界中的碳元素主要由 ^{12}C 与 ^{13}C 两种同位素构成,化石燃料的燃烧等人类活动产生的二氧化碳主要是 $^{12}\text{CO}_2$, 通过研究 $^{13}\text{CO}_2$ 在空气中的体积分数,可以量化研究人为排放源。Morimoto 等^[1] 的研究论证,对流层中层和高层的 CO_2 浓度由于大气的对流与交换,其与近地表的浓度变化息息相关。所以对大气中碳元素同位素浓度的监测可以提供有关温室气体“源”和“汇”信息,进而利用这些信息研究大气的输送机制。

关于 $^{13}\text{CO}_2$ 在总大气柱中变异性的现有数据非常有限。在不同的观测地点, $^{13}\text{CO}_2$ 不同季节的现场变异性报告有所不同。目前关于 $^{13}\text{CO}_2$ 的测定都是基于地面气象站对近地表的 $^{13}\text{CO}_2$ 含量进行测定,或是利用热气球携带仪器对大气中高层的 $^{13}\text{CO}_2$ 含量进行实验测定^[2]。目前使用卫星观测手段对 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度进行反演的研究极少, Rozanov 等^[3] 曾针对 GOSAT 产品中 $^{13}\text{CO}_2$ 的反演测量结果进行分析讨论,列举了反演中遇到的瓶颈问题,以及未来遥感器的改进方向。对于 CO_2 的卫星测量研究,大多是关于近红外波段和 $15\ \mu\text{m}$ 热红外波段的研究,关于 CO_2 $4.3\ \mu\text{m}$ 强吸收带的研究较少,并且现有的卫星数据中 GOSAT^[4] 卫星不包含 $4.3\ \mu\text{m}$ 通道的光谱, AIRS 卫星通道的数据光谱分辨率较低,无法探测到 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度的变化, TES 数据产品的光谱分辨率较高,但其中红外波段的光谱数据存在精度不足的问题,无法使用。目前针对中红外超光谱的研究非常缺乏,然而 $4.3\ \mu\text{m}$ 带包含了同位素 $^{13}\text{CO}_2$ 的显著光谱特征,可以用来区分不同“源”和“汇”的贡献。化石燃料燃烧(煤和天然气的燃烧)和水泥生产缓慢地改变着环境大气中碳元素同位素成分的分布,同位素占比的特征范围为 $-2.4\% \sim -4.4\%$ 。大气中重同位素的降低是由于无节制地持续使用化石燃料所致。据统计,全球大气 CO_2 的平均 ^{13}C 正以每年 0.002% 的速度降低。据此,本文

利用中红外波段对同位素 $^{13}\text{CO}_2$ 的敏感性,间接地为大气 CO_2 排放来源的研究提供一种依据,分析利用中红外超光谱开展遥感探测的可行性。

2 模型与方法

目标与环境的反射辐射能量和发射辐射能量在大气传播过程中会被气体分子和气溶胶吸收、散射,最终被卫星遥感接收。对卫星遥感接收到的信号进行处理,并作辐亮度转换,可以得到对应的入射光谱。在 CO_2 吸收波段,光谱中包含 CO_2 的吸收特征,通过一系列复杂的反演计算,可从中获取 CO_2 的浓度信息。在进行光谱计算与特性分析时,我们联合使用了辐射传输模型(SCIATRAN)^[5] 和高分辨透射率谱线(HITRAN)^[6] 光谱数据库。

本研究利用 SCIATRAN 模拟中红外光谱的辐射特性,研究其参数的敏感性。SCIATRAN 是由德国不莱梅大学遥感学院的研究人员在 GOMETRAN (transmission model of global ozone monitoring experiment) 基础上开发的高分辨率大气辐射传输模型,不仅可以对观测光谱进行快速、精确的模拟,还可以用于地基、空基,以及大气中任意高度观测光谱的模拟^[7]。通过 HITRAN 库可以调整 CO_2 廓线中不同同位素的比重。HITRAN 数据库已被广泛应用于辐射传输计算、大气遥感和探测等领域。HITRAN 数据库中每条谱线包含分子代号、同位素代号、中心波数、谱线强度和低态能量等参数信息^[8]。

卫星传感器接收到的辐亮度值 y 是由完整的大气状态、各成分含量等参数确定^[9],在进行大气辐射传输模拟时,所模拟物理量与本文研究的大气参数的变化关系可表示为

$$y = F(x) + \varepsilon, \quad (1)$$

式中: $F(x)$ 本质上为正向辐射传输模式; x 为环境参数; ε 为误差向量。

3 中红外光谱特性分析

由散射辐亮度模式计算的总辐亮度,是观察点在视线方向接收到的辐亮度,是路径热辐射、热散射、表面辐射之和。通过辐射传输前向模型计算各能量贡献,可以明显发现,中红外的光谱辐亮度主要是由路径大气的热辐射提供,如图 1 所示。

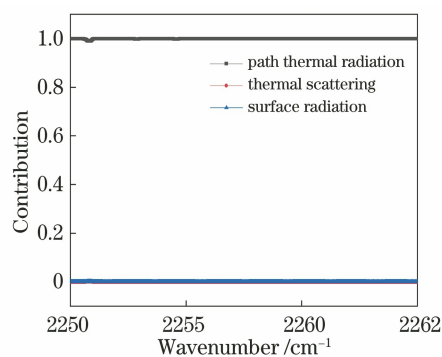
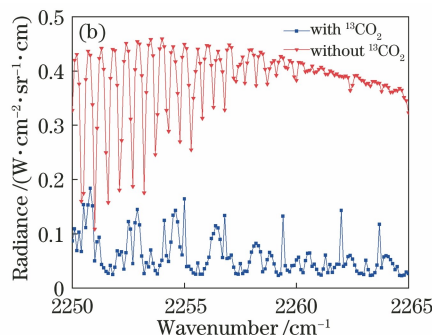
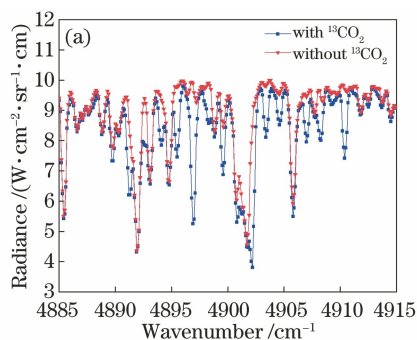


图 1 中红外光谱的能量贡献占比图

Fig. 1 Energy contribution chart of mid-infrared spectroscopy

该波段是 CO_2 饱和吸收区,由于该区间大气不

图 2 近红外与中红外光谱对 $^{13}\text{CO}_2$ 的敏感性。(a)近红外波段;(b)中红外波段Fig. 2 Sensitivity of near infrared and mid-infrared spectroscopy to $^{13}\text{CO}_2$.

(a) Near infrared band; (b) mid-infrared band

以 CO_2 柱浓度为 390×10^{-6} 为基础,研究柱浓度分别变化 $(-60, -40, -20, 20, 40, 60) \times 10^{-6}$ 时的相应光谱曲线,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,随着 CO_2 柱浓度的变化,光谱亮度值的变化较大,且在整个波段内变化都较明显,其中吸收峰处的变化更强烈, CO_2 柱浓度变化 20×10^{-6} 时光谱变化最大为 $2 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 。 CO_2 主要在大于 $2 \mu\text{m}$ 的红外区有吸收,其中在较短波长 $4.3 \mu\text{m}$ 区具有吸收带,且其吸收带强度高于 $15 \mu\text{m}$ 处的吸收带,因此可知中红外光谱对 CO_2 的敏感性较强。

利用大气辐射传输模型分别模拟了两条中红外光谱,波段设置为 $4.3 \mu\text{m}$ 波段($2250 \sim 2265 \text{ cm}^{-1}$)。模拟光谱输入 CO_2 廓线时,将其中一条光谱的 $^{13}\text{CO}_2$ 含量设置为零,另一条光谱则为自然界中的真实含量, $^{13}\text{CO}_2$ 体积是 CO_2 体积的 1.1% 。

图 4 中正方形标志和圆形标志分别是模拟输入参量中含有 $^{13}\text{CO}_2$ 和不含 $^{13}\text{CO}_2$ 的中红外光谱图。从图中可以很明显看出含有 $^{13}\text{CO}_2$ 的光谱整体辐亮

透明,太阳辐射很难到达地面,地面热辐射也很难到达大气顶,地面反射同理,因此卫星看到的信号基本是中上层大气的热辐射,值比其他波段要小很多。并且,卫星观测值基本不受地表、太阳入射几何的影响。

3.1 目标特性分析

Gribanov 等^[10]对比研究了 $700 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 热红外波段和 $4885 \sim 4915 \text{ cm}^{-1}$ 近红外波段的光谱,结果表明近红外波段比热红外波段的 $^{13}\text{CO}_2$ 的吸收特征更加明显。本文在前人研究的基础上,对比了中红外波段与近红外波段光谱对 $^{13}\text{CO}_2$ 的敏感性,发现中红外波段的吸收特征相比于近红外波段而言更为明显,如图 2 所示。

度值偏小,说明其被吸收的能量较多,进一步说明了 $^{13}\text{CO}_2$ 相比于 $^{12}\text{CO}_2$ 在 $2250 \sim 2265 \text{ cm}^{-1}$ 谱段内的吸收能力更强。其绝大部分的能量吸收是由 $^{13}\text{CO}_2$ 所致。

为了进一步研究 $^{13}\text{CO}_2$ 对中红外光谱的影响,依次将 $^{13}\text{CO}_2$ 的体积分数 $V(^{13}\text{CO}_2)$ 设置为 0.5% 、 1.1% 、 1.5% 、 2.0% 进行模拟,如图 5 所示。光谱的辐亮度大小随着 $^{13}\text{CO}_2$ 的体积分数增加而逐渐减小,这说明 $^{13}\text{CO}_2$ 增加,导致 CO_2 的吸收能力增强,进而说明绝大部分热能都是被 $^{13}\text{CO}_2$ 所吸收,其在 CO_2 成为温室气体中扮演了举足轻重的角色。

为了探究适宜中红外探测的 CO_2 浓度的高度分布,模拟了 CO_2 随高度变化的权重函数,从权重函数分布图(图 6)上可以非常直观地得到,权重函数在 $0 \sim 20 \text{ km}$ 范围内先增加后减少,在 10 km 处达到最大值,在 $5 \sim 15 \text{ km}$ 处的权重处于较大的水平,可得中红外对 $5 \sim 15 \text{ km}$ 处的 CO_2 浓度变化较为敏感,这种高敏感性可以使得反演的精度提高。

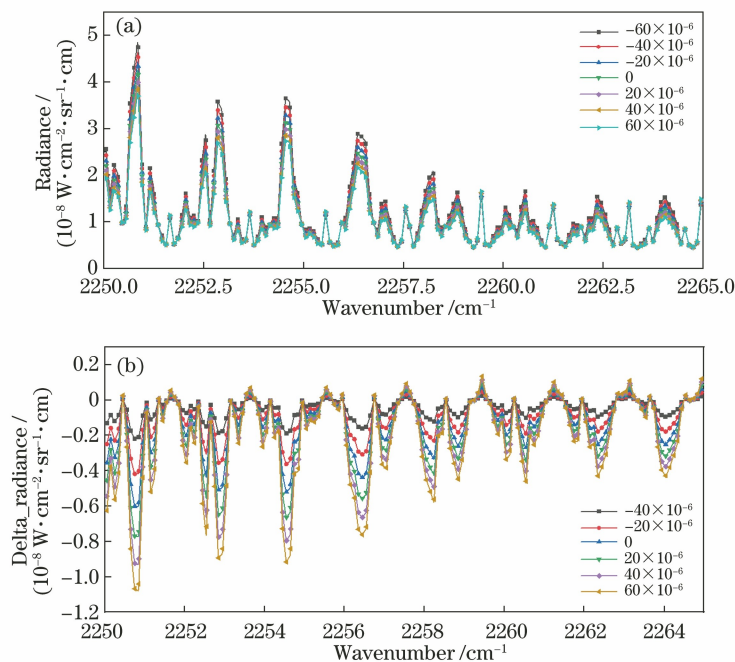


图 3 中红外光谱对 CO₂ 浓度变化的敏感性。(a) 光谱变化; (b) 光谱差值
Fig. 3 Sensitivity of mid-infrared spectroscopy to changes in CO₂ concentration.

(a) Spectral variation; (b) spectral difference

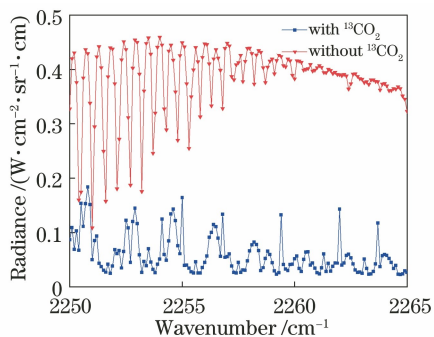


图 4 大气 CO₂ 中 ¹³CO₂ 对光谱的影响示意图
Fig. 4 Influence of ¹³CO₂ in atmospheric CO₂ on the spectrum

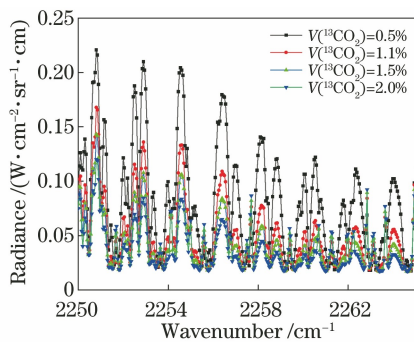


图 5 ¹³CO₂ 体积分数不同的中红外光谱图
Fig. 5 mid-infrared spectra under different ¹³CO₂ volume fractions

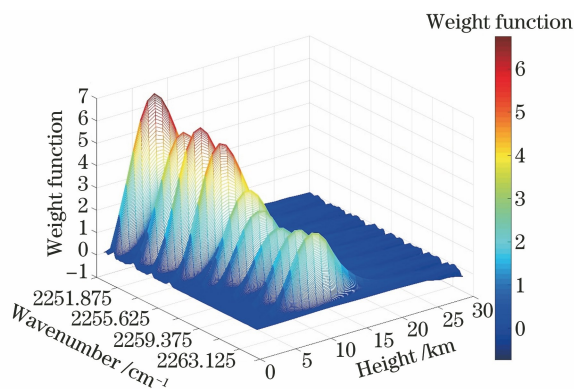


图 6 CO₂ 在中红外随高度变化的权重函数
Fig. 6 CO₂ weight function in mid-infrared with height

3.2 环境影响分析

为了利用中红外光谱高精度地反演大气 CO₂, 需要分析大气环境要素对反演精度的影响。选取温室气体反演中常见的环境影响因素以及对中红外光谱较敏感的因素进行分析研究, 以筛选出对中红外光谱能量值影响较大的因素, 以此来评价其对碳同位素含量反演精度的影响。研究表明, 这一波段的影响因素主要包括 CO₂ 浓度、温度廓线、气溶胶、水汽廓线、氧化亚氮廓线等几个方面。为了研究各种参量对中红外光谱的影响, 将从地表反射率、温度廓线、气溶胶、水汽廓线、氧化亚氮廓线几个方面分析中

红外光谱对各参量的敏感性,选取对 CO₂ 廓线较敏感而又受其他参量影响较小的通道,反演中红外波段的 CO₂ 廓线及 ¹³CO₂ 廓线。

通过模拟分析不同环境要素的敏感性,可得出以下结论:

1) 由于卫星遥感接收到的是地表和大气混合信号,因此首先开展相关的地表影响分析。将输入参数中的地表反射率设置为 0.1~0.7,步长为 0.1,计算得到光谱,然后以反射率 0.1 为基准,讨论地表反射率变化对光谱的影响。从图 7(a) 可以看

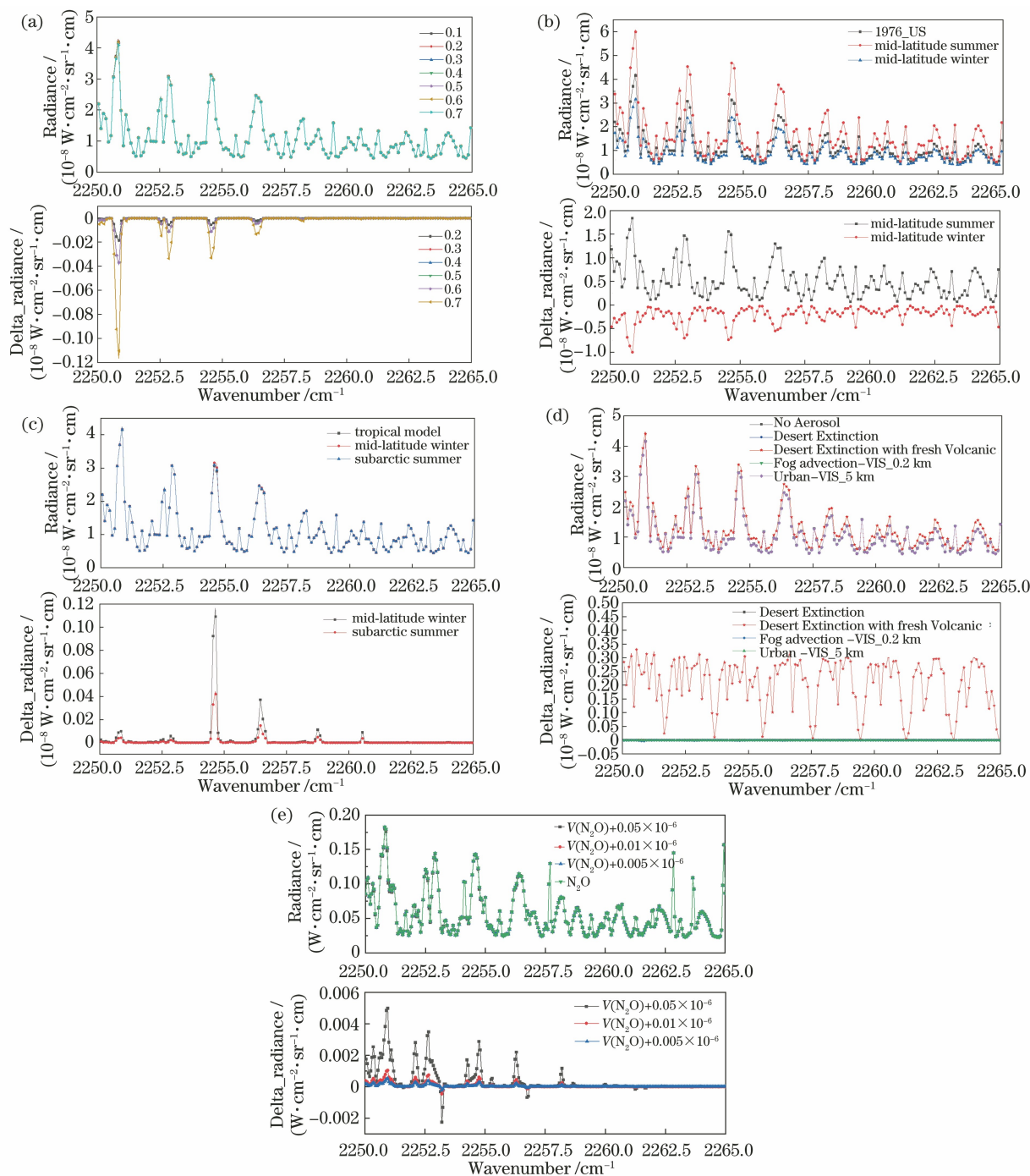


图 7 中红外光谱对环境参数的敏感性研究。(a)光谱对地表反射率的敏感性;(b)光谱对温度廓线的敏感性;(c)光谱对水汽廓线的敏感性;(d)光谱对气溶胶的敏感性;(e)光谱对氧化亚氮廓线的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of mid-infrared spectroscopy to environmental parameters. (a) Sensitivity of spectrum to the reflectance of the earth's surface; (b) sensitivity of spectrum to the temperature profile; (c) sensitivity of spectrum to water vapor profile; (d) sensitivity of spectrum to aerosol; (e) sensitivity of spectrum to nitrous oxide profile

出,地表反射率的变化引起的光谱变化主要体现在几个强吸收峰处,其中 2251 cm^{-1} 的吸收峰处最为明显,地表反射率变化 0.6 时引起的光谱变化最大为 $6 \times 10^{-10}\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 。

2) 将输入参数中的温度廓线分别设置为美国标准大气、中纬度夏季、中纬度冬季中的标准廓线,计算得到光谱,然后以美国标准大气中的温度廓线为基准,讨论温度廓线变化对光谱的影响。从图 7(b)可以看出,温度廓线的变化对光谱的影响比较强烈,整个波段都随温度廓线的变化发生了较大的改变。对于光谱的中长波区域,温度改变对光谱的影响程度要大于 CO_2 浓度变化对光谱的影响。由于普朗克函数的非线性,短波区域对温度不确定性的敏感性较低,但仍然比 CO_2 浓度变化对光谱的影响程度要大,中高层热辐射对温度的敏感性较强。

3) 将输入参数中的水汽廓线分别设置为美国标准大气、中纬度夏季、中纬度冬季中的标准廓线,计算得到光谱,然后以美国标准大气中的水汽廓线为基准,讨论水汽廓线变化对光谱的影响。从图 7(c)可以看出,水汽廓线的变化对光谱的影响较弱,但是在吸收峰 2254.55 cm^{-1} 处较为敏感,引起光谱的最大变化量为 $10^{-10}\text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 量级。 H_2O 对辐射能具有很强的吸收性,是其他大气成分吸收的几倍,吸收带主要分布在近红外区。但在 $4.416 \sim 4.444\ \mu\text{m}$ 处的吸收较弱。

4) 将输入参数中的气溶胶模式分别设置为 No Aerosol、Desert Extinction、Desert Extinction with fresh Volcanic、Fog advection - VIS_0.2 km、Urban - VIS_5 km,计算得到光谱,然后以 No

Aerosol 为基准,讨论气溶胶模式变化对光谱的影响。从图 7(d)可以看出,气溶胶类型的变化对光谱几乎没有影响,除非大气中云和尘埃等大颗粒质点较多时。大气对中长波辐射的散射影响极小,因为气溶胶的沉降,一般中高层大气中气溶胶含量较少,且颗粒较小。但在沙尘型气溶胶的基础上给对流层加入火山喷发的大粒子时,气溶胶对光谱的影响还是较大的。

5) 根据资料,氧化亚氮在 $4.3\ \mu\text{m}$ 通道附近有吸收,分别将 N_2O 廓线浓度加上 $(0.05、0.01、0.005) \times 10^{-6}$,依次探讨中红外光谱对 N_2O 廓线的敏感性。从图 7(e)中可以看出, N_2O 廓线浓度的变化对中红外光谱的影响还是较大的,在反演 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度时,该影响因素需要重视。

通过对影响因素的研究,可以得出:地表与气溶胶对中红外光谱的影响非常小,可以忽略不计;水汽在几个吸收较强的通道对光谱有一定的影响,但总体上的影响较小;影响较大的因素主要是 N_2O 和温度,这两因素需要较高的精度才能达到反演 $^{13}\text{CO}_2$ 的要求。

4 反演 $^{13}\text{CO}_2$ 要求分析

为了能探测到 $^{13}\text{CO}_2$ 的浓度变化, CO_2 的反演精度要求至少达到 0.5×10^{-6} ^[11]。因此,以此条件依次分析 $^{13}\text{CO}_2$ 的影响因素及其精度要求。以 CO_2 廓线增加 0.5×10^{-6} 为基准,算出光谱对应的变化量。以此变化量为基准,计算温度廓线的精度最低达到什么标准才能探测到 $^{13}\text{CO}_2$ 的浓度变化,计算结果如图 8 所示。

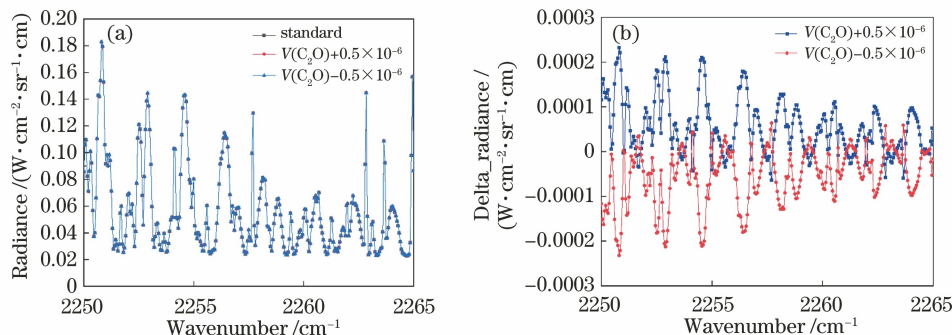


图 8 CO_2 浓度变化对中红外光谱影响。(a)光谱图;(b)差值图

Fig. 8 Influence of CO_2 concentration changes on mid-infrared spectroscopy.

(a) Spectral diagram; (b) difference graph

根据上述中红外波段光谱特征及光谱敏感性的分析结论,选择以水汽廓线、温度廓线、氧化亚氮廓线以及仪器信噪比 4 个方面来探讨能够探测

出 $^{13}\text{CO}_2$ 变化的条件。

上文研究得出中红外探测的主要能量主要来自大气的热发射,因此中红外光谱对温度廓线非常敏

感。如图 9(a) 所示, 随着温度的增大, 光谱辐亮度随之增大。通过分析辐亮度的变化量可以发现, 当

温度廓线的精度达到 0.03 K 时, 可以探测到 $^{13}\text{CO}_2$ 的浓度变化。

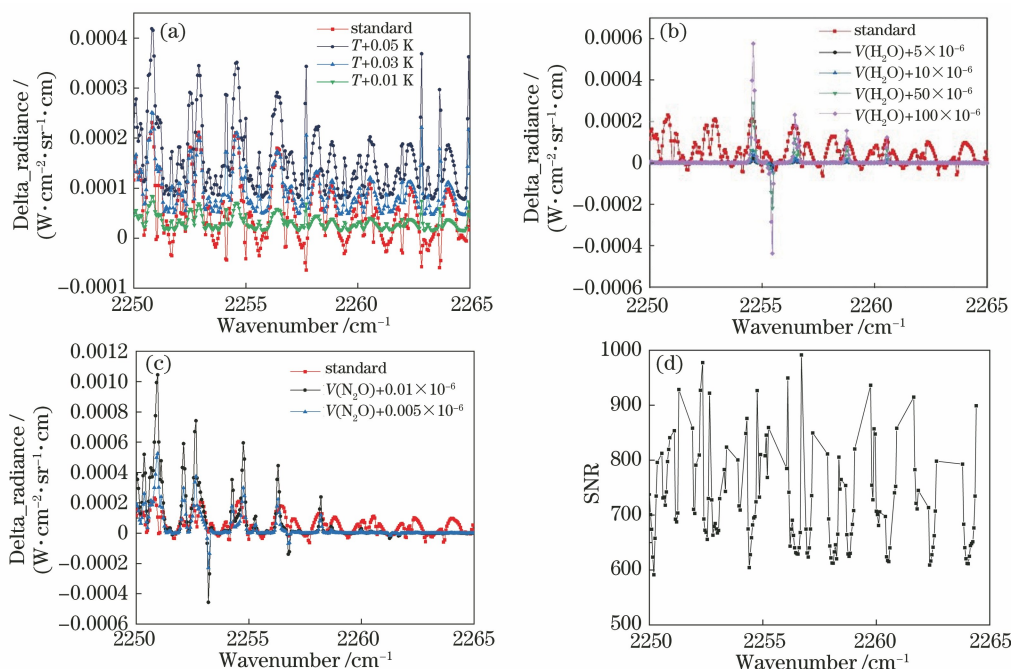


图 9 中红外光谱随环境廓线变化阈值示意图。(a) 温度廓线精度要求; (b) 水汽廓线精度要求; (c) 氧化亚氮廓线精度要求; (d) 仪器信噪比要求

Fig. 9 Schematic diagrams of the threshold value of the mid-infrared spectrum changing with the environmental profile.

(a) Temperature profile accuracy requirement; (b) water vapor profile accuracy requirement; (c) requirement for the accuracy of nitrous oxide profile; (d) requirement for instrument signal-to-noise ratio

从图 9(b) 中可以看出, 水汽廓线对中红外的光谱影响较小, 只在个别波段有较强的影响, 通过调整 H_2O 的变化量, 可以得到 H_2O 的廓线精度达到 50×10^{-6} 时可以探测到 $^{13}\text{CO}_2$ 的浓度变化。目前水汽的廓线测量精度可以满足 $^{13}\text{CO}_2$ 的反演要求。

度作为信噪比的条件, 可以看出, 想要测量到 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度的变化量, 信噪比的值必须要大于 600, 见表 1。

表 1 不同影响因素导致中红外辐亮度变化分析
Table 1 Analysis of the changes of mid-infrared radiance caused by different influencing factors

Variable	Mean change
$V(\text{CO}_2) + 0.5 \times 10^{-6}$	0.01605642
$V(\text{H}_2\text{O}) + 50 \times 10^{-6}$	0.01206256
$T + 0.5 \text{ K}$	0.48652348
$T + 0.05 \text{ K}$	0.048113659
$T + 0.03 \text{ K}$	0.018853932
$T + 0.01 \text{ K}$	0.009613299
$V(\text{N}_2\text{O}) + 0.05 \times 10^{-6}$	0.107343663
$V(\text{N}_2\text{O}) + 0.01 \times 10^{-6}$	0.022041572
$V(\text{N}_2\text{O}) + 0.005 \times 10^{-6}$	0.011058106
SNR	600

N_2O 是一种非常重要的温室气体, 平均寿命约为 121 a。 N_2O 分子具有一个线型而不对称的结构。它具有单一的转动常数和可测的转动光谱。由基频、泛频和组合频率所产生的许多谱带存在于红外谱区中, 三个基频的中心分别位于 1284.91 cm^{-1} , 288.77 cm^{-1} , 以及 2223.76 cm^{-1} 。其在 $4.4 \mu\text{m}$ 波段具有吸收特性。通过调整其浓度, 发现当其精度达到 5×10^{-9} 时, 可满足反演要求。

通过对中红外特征和敏感性的研究, 筛选出对 CO_2 影响较大的几项影响因素, 通过对这几项因素的定量化研究, 发现水汽的影响较小, 目前的水汽廓线可以满足反演的要求。但是反演对温度廓线、氧化亚氮廓线精度与对信噪比的要求高, 其中温度廓线需要满足高于 0.03 K 的精度, 氧化亚氮廓线需要

测量噪声一般由探测器噪声组成, 探测器噪声与输入信号的强度呈函数关系。而辐射亮度是地表反射率和测量几何(太阳天顶角、观测天顶角和两者之间的相角)的函数。能够探测到 $^{13}\text{CO}_2$ 的条件是噪声信号不得大于探测量的最小辐亮度比率, 因此将 CO_2 廓线浓度改变 0.5×10^{-6} , 以此变化的辐亮

高于 5×10^{-9} 的精度,仪器的信噪比需要高于 600。满足以上条件,则可以开展中高层 $^{13}\text{CO}_2$ 的反演工作。该结论对于高光谱探测器的仪器制造提出了不小的挑战,也指明了前进的目标与方向。

5 结 论

环境的损耗牵动着经济升级与产业调整,温室效应的问题亟待解决。其中区分 CO_2 人为与自然排放源是研究“源”与“汇”的重点。通过研究中红外通道 $2250 \sim 2265 \text{ cm}^{-1}$ 的光谱特性,得出光谱反演 CO_2 的主要影响因素有水汽、温度和氧化亚氮;研究中还发现 $4.3 \mu\text{m}$ 通道光谱对对流层中层和高层 ($5 \sim 15 \text{ km}$) CO_2 浓度变化非常敏感。在探究遥感卫星能够捕捉 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度变化的基础上,给出了反演的基本要求,其中水汽廓线需要满足 50×10^{-6} 的精度,温度廓线需要满足高于 0.03 K 的精度,氧化亚氮廓线需要高于 5×10^{-9} 的精度,仪器的信噪比需要高于 600。该结论为之后的反演工作提供了理论依据,也为超光谱探测器的仪器制造提出了不小的挑战,同时指明了前进的目标与方向,通过研究对流层中层和高层的 CO_2 同位素含量变化,可以更好地掌控 CO_2 “源”与“汇”和输送规律,了解全球碳循环收支。

参 考 文 献

- [1] Morimoto S, Nakazawa T, Higuchi K, et al. Latitudinal distribution of atmospheric CO_2 sources and sinks inferred by $\delta^{13}\text{C}$ measurements from 1985 to 1991 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, 105(D19): 24315-24326.
- [2] Behrens J B, Yan Y, Knohl A, et al. A new instrument for stable isotope measurements of ^{13}C and ^{18}O in CO_2 : instrument performance and ecological application of the Delta Ray IRIS analyzer [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(11): 4537-4560.
- [3] 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 and Radiative Transfer*, 2014, 133: 13-71.
- [4] Wu H, Wang X H, Ye H H, et al. Cloud detection algorithm for greenhouse gas retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0501001.
吴浩, 王先华, 叶函函, 等. 用于温室气体反演的云检测算法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0501001.
- [5] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, et al. SCIATRAN 2.0: a new radiative transfer model for geophysical applications in the 175-2400 nm spectral region [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(5): 1015-1019.
- [6] Rothman L S, Gordon I E. The HITRAN molecular database [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1545: 223.
- [7] Jiang Y, Ye H H, Wang X H, et al. Influence of chlorophyll fluorescence on retrieval accuracy of carbon dioxide and the correction method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0901004.
蒋芸, 叶函函, 王先华, 等. 叶绿素荧光对 CO_2 反演的影响及校正方法研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0901004.
- [8] Dai C M, Wei H L, Hu S X, et al. Analysis on upper atmospheric radiance transfer characteristic to different HITRAN databases [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0501001.
戴聪明, 魏合理, 胡顺星, 等. 不同版本 HITRAN 数据库对高层大气辐射传输影响特性分析 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0501001.
- [9] Li Q Q, Wang X H, Ye H H, et al. Atmospheric CO_2 inversion error analysis and accuracy verification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0601003.
李勤勤, 王先华, 叶函函, 等. 大气 CO_2 反演误差分析与精度验证 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0601003.
- [10] Griбанov K, Zakharov V, Rokotyan N, et al. Bottlenecks in the remote sensing of the $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ isotopic ratio from GOSAT measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 10466: 104661Q.
- [11] Duan F H, Wang X H, Ye H H, et al. Carbon dioxide retrieval method based on statistics and optical path distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0501003.
段锋华, 王先华, 叶函函, 等. 基于统计与光程分布的二氧化碳反演方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0501003.