

## 激光与光电子学进展

基于比值法的大气 CO<sub>2</sub> 反演与地表反射率分析王新强<sup>1,2</sup>, 梁秋裕<sup>1,2</sup>, 叶松<sup>1,2</sup>, 王方原<sup>1,2</sup>, 李树<sup>1,2</sup>, 银珊<sup>1,2</sup>, 甘永莹<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;<sup>2</sup>广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是造成温室效应的气体之一,其浓度的空间分布对气候预测和人类生产、生活的影响不可忽视,实现CO<sub>2</sub>浓度的准确反演有利于掌控全球CO<sub>2</sub>时空分布。但是在近红外波段,地表反射率的不确定对CO<sub>2</sub>浓度反演存在影响。引入比值法对卫星对地辐射光谱进行处理,验证吸收波段辐亮度比值与CO<sub>2</sub>浓度之间存在某种关系,该关系反演CO<sub>2</sub>浓度具有可行性。以MODTRAN4仿真的辐亮度光谱为数据源,选取4个特征吸收峰的光谱辐亮度比值与CO<sub>2</sub>浓度进行分析。结果显示,光谱辐亮度比值与CO<sub>2</sub>浓度存在近似线性关系,而且在6310 cm<sup>-1</sup>处的线性关系更为明显,误差仅有1.15%。然后通过设置不同的大气模式和气溶胶模式,进一步对辐亮度比值与浓度之比进行剖析,结果表明,在0.1~0.9反射率区间,两者呈高度相关,相关系数高达0.98,平均误差不超过2%。最后对实测数据进行相同处理,与仿真数据进行了对比。在4个波段的拟合中,6334 cm<sup>-1</sup>处拟合效果最好,线性关系达到了0.99,从另一方面说明了光谱辐亮度比值与CO<sub>2</sub>浓度存在线性关系,这种关系可以很好地应用于CO<sub>2</sub>浓度的反演,近似消除地表反射率影响。

**关键词** 大气光学; 二氧化碳浓度反演; 地表反射率; 比值法; MODTRAN4

中图分类号 X131.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0101001

## Atmospheric Carbon Dioxide Inversion and Surface Reflectance Analysis Based on Ratio Method

Wang Xinqiang<sup>1,2</sup>, Liang Qiuyu<sup>1,2</sup>, Ye Song<sup>1,2</sup>, Wang Fangyuan<sup>1,2</sup>, Li Shu<sup>1,2</sup>, Yin Shan<sup>1,2</sup>, Gan Yongying<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;<sup>2</sup>Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** One of the gases responsible for the greenhouse effect is carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). For climate prediction, human production, and human life, the spatial distribution of CO<sub>2</sub> concentrations must be considered. Controlling the spatial and temporal distribution of CO<sub>2</sub> worldwide requires an accurate inversion of CO<sub>2</sub> concentrations. However, in the near-infrared band, surface reflectance uncertainty affects the inversion of CO<sub>2</sub> concentration. The ratio method is introduced to process the satellite ground-to-ground radiation spectrum, and it is verified that the absorption band radiance ratio and CO<sub>2</sub> concentration are related; moreover, inverting the CO<sub>2</sub> concentration using the relationship is feasible. The data source was the MODTRAN4-simulated radiation spectrum, and the four absorption peaks' spectral radiance ratio and CO<sub>2</sub> concentrations were selected for analysis. The results show that

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-04-17; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(41561079,62005059)、中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室研究项目、广西光电信息处理重点实验室基金(GD18104,GD18105)

通信作者: \*sugargan@163.com

the spectral radiance ratio and CO<sub>2</sub> concentration have an approximately linear relationship, and the linear relationship is evident at 6310 cm<sup>-1</sup>, with an error of only 1.15%. The ratio of radiance ratio to concentration is further investigated using various atmospheric and aerosol models. The results show the radiance ratio and concentration are highly correlated in the range of 0.1-0.9 reflectivities, the correlation coefficient is up to 0.98, and the average error is less than 2%. The measured data is subjected to the same processing as the simulation data, and the results are compared with simulated data. The linear relationship at 6334 cm<sup>-1</sup> is the best among the four bands, and the linear relationship reaches 0.99. It shows that the spectral radiance ratio and CO<sub>2</sub> concentrations have a linear relationship, and this relationship can be effectively applied to the inversion of CO<sub>2</sub> concentration, effectively eliminating surface reflectance.

**Key words** atmospheric optics; CO<sub>2</sub> concentration inversion; surface reflectance; ratio method; MODTRAN4

## 1 引言

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是造成温室效应的主要气体,也是植物光合作用的主要原料,对其进行监测不仅在环境保护方面起到积极作用,还在农业生产方面意义深远<sup>[1-2]</sup>。因此,监测温室气体浓度变化成为全球密切关注的课题。刘丹丹等<sup>[3]</sup>用地基傅里叶光谱仪(EM27/SUN)观测合肥地区的温室气体,发现测量期间包含二氧化碳在内的温室气体柱浓度变化较大,空间分布变化较大的特点给探测其浓度带来了很大问题。二氧化碳的探测主要有地基观测和天基观测两种方式,由于地基站点分布零散,只能进行局部二氧化碳探测,很难实现全球范围内监测,所以天基观测方式成为了研究重点。要从天基站中尽可能获取准确的二氧化碳浓度不仅需要高精度探测仪器,还需要高精度大气辐射传输模型。地表反射率对卫星对地观测可获得的太阳辐射通量有着重要影响,进而影响着二氧化碳浓度反演精度。Aben等<sup>[4]</sup>利用模拟数据,指出当反射率从0.1变化到0.5时,反演二氧化碳柱浓度时最大会有-5%~5%的误差。叶松等<sup>[5]</sup>用SCIATRAN软件仿真太阳辐射光谱,发现地表反射率每改变0.1,大气顶辐亮度会改变20%。

大多数地表反射具有方向性,地表二向反射分布函数(BRDF)的提出就是为了描述这种反射特性<sup>[6]</sup>。然而Lucht等<sup>[7]</sup>发现在卫星观测中,影响BRDF计算的外界因素太多,BRDF获取的数据往往会不准。Deering等<sup>[8]</sup>仿真了不同仪器观测角和太阳天顶角下三种阔叶林的BRDF,发现不同观测天顶角和方位角条件下所得到的地表反射率存在较大差异。想要准确获取一定区域的地表反射率具有较大难度。赵春艳等<sup>[9]</sup>建立了敦煌场高光谱BRDF模型,根据卫星过境时刻几何数据,用该模型可直接计算得到卫星观测

方向的反射率,但是需要用无人机对敦煌辐射校正场进行地表方向特性测量。城市是CO<sub>2</sub>的重要来源,为此吴浩等<sup>[10]</sup>针对北京城区构建了一种利用单次观测数据反演的BRDF模型,并提出一种同时反演地表BRDF参数和大气CO<sub>2</sub>含量的算法,可以有效校正地表二向反射带来的CO<sub>2</sub>反演误差。

为了消除地表反射不确定对二氧化碳浓度反演的影响,本文引入辐亮度比值法,利用MODTRAN4仿真卫星对地吸收谱线作为数据源,对光谱辐亮度比值与二氧化碳浓度(在MODTRAN4中,二氧化碳浓度指整层大气柱浓度,用CO<sub>2</sub>体积比表示)之间的关系进行分析,结合实测数据进行对比,验证它们之间存在的关系,在近似消除地表反射率影响的情况下,根据这种关系反演二氧化碳浓度。

## 2 基本原理

### 2.1 二氧化碳反演原理

反演方法的有效性和可行性需要结合实际观测结果来进行验证。前向模型即大气辐射传输模型,描述了太阳辐射从大气到地面再到卫星遥感器所经过的物理过程。

前向模型模拟的大气顶出射辐亮度向量的表达式<sup>[11]</sup>为

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(x, b) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}$ 是前向模型; $b$ 为固定输入参数,一般认为是已知的; $x$ 代表待反演的大气状态参数,在此处为CO<sub>2</sub>浓度; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为探测器的测量误差向量。二氧化碳反演就是通过前向模型模拟辐射光谱与实测光谱之间的迭代拟合,获得反演结果。具体反演算法是通过大气辐射传输模型模拟光谱,再用高斯-牛顿迭代法求解反演模型。

### 2.2 大气辐射传输模型

大气二氧化碳浓度精确反演需要一个准确的

大气辐射传输模型,该模型必须全面考虑辐射传输物理过程,在给定分子谱线数据库和辅助数据情况下,快而准地计算出进入传感器的辐亮度。MODTRAN4在LOWTRAN基础上,将光谱半峰全宽由 $20\text{ cm}^{-1}$ 减小到 $1\text{ cm}^{-1}$ ,二氧化碳反演精度更高,对 $30\text{ km}$ 以上的路径计算更加精确(不适用于中高层大气反演)。而且在描述辐射传输过程时,其内部采用了Voigt谱吸收线型积分函数,能更好计算大气分子的吸收谱线。

MODTRAN4提供了MODTRAN、LOWTRAN from MODTRAN、MODTRAN correlation-k 3种大气传输计算方式,以及1976年美国标准大气、中纬度冬季、中纬度夏季等8种大气模式,可以对不同纬度、不同季节、不同地区的大气辐射情况进行仿真模拟;此外,大气传输路径、气溶胶模式、地表温度、反射率都可以进行设置,用户甚至可以根据实际需要选择输出的计算结果。选择MODTRAN4进行

大气辐射计算,最后输出 $1.58\text{ }\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ 吸收带的辐亮度光谱图。

### 3 二氧化碳吸收波段选择

二氧化碳浓度反演时需要选择一个对二氧化碳吸收适中的波段,吸收太弱会对浓度变化不敏感,吸收太强容易饱和。此外,影响大气中红外辐射传输的主要气体除了 $\text{CO}_2$ 外,还有水汽、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$ 等,所以选择的波段要尽可能规避这些气体的影响,减小二氧化碳反演误差。图1(a)为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等分子的透过率谱,可以看到, $4.3\text{ }\mu\text{m}$  ( $2326\text{ cm}^{-1}$ )、 $2.7\text{ }\mu\text{m}$  ( $3704\text{ cm}^{-1}$ )、 $2\text{ }\mu\text{m}$  ( $5000\text{ cm}^{-1}$ )和 $1.6\text{ }\mu\text{m}$  ( $6250\text{ cm}^{-1}$ )带都是 $\text{CO}_2$ 吸收带。 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 带和 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 带被 $\text{CO}_2$ 所吸收,但被 $\text{H}_2\text{O}$ 的吸收也很大,而且 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 带吸收易饱和,不适合 $\text{CO}_2$ 的反演; $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 带和 $2\text{ }\mu\text{m}$ 带两者相比, $2\text{ }\mu\text{m}$ 带是强吸收带,且受水汽影响。

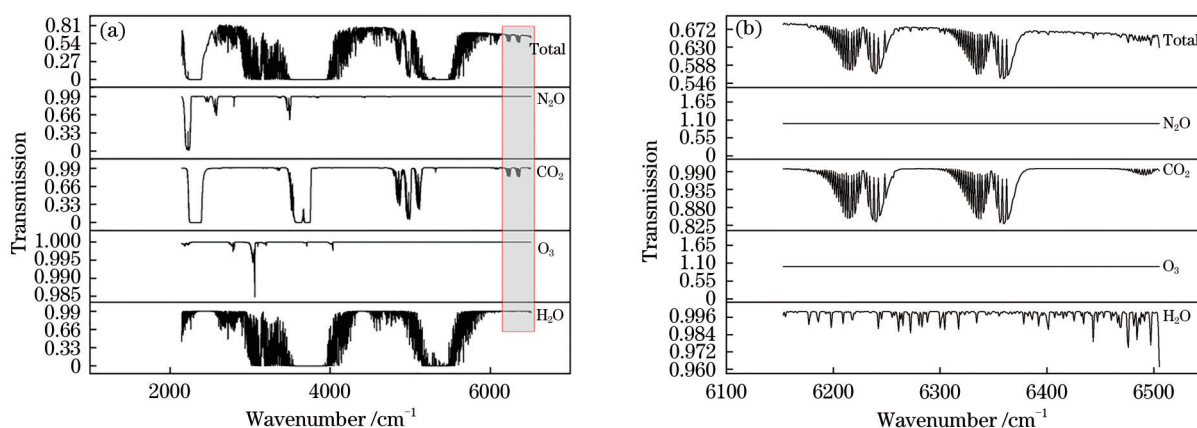


图1 不同气体的透过率谱。(a)  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 透过率谱;(b)局部放大图

Fig. 1 Transmittance spectra of each gas. (a) Transmittance spectra of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , and  $\text{H}_2\text{O}$ ; (b) local magnification

由图1(b)局部放大图可以看出,由 $\text{CO}_2$ 分子振动-转动形成的 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 吸收带受其他气体影响较小,并且此波段为弱吸收带,不易饱和,所以 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 更适合用于二氧化碳反演。 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 又可细分为 $1.61\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.58\text{ }\mu\text{m}$ 两个子波段,经综合考虑,选择 $1.58\text{ }\mu\text{m}$ 子波段进行分析研究。

查找2015年2月12日的天文年历可知,太阳赤纬为 $-13^\circ 52' 10.9''$ ,视赤经为 $32^\circ 30' 1''$ 。2015年2月12日,北京时间14:53,在安徽合肥(东经 $31^\circ 52'$ ,北纬 $117^\circ 17'$ )观测太阳辐射,当时太阳天顶角 $\theta=59.917^\circ$ ,太阳仰角 $h=32.0829^\circ$ ,太阳方位角 $\vartheta=129.132^\circ$ 。根据以上数据,仿真出 $1.58\text{ }\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ 吸收带辐亮度谱,如图2所示。

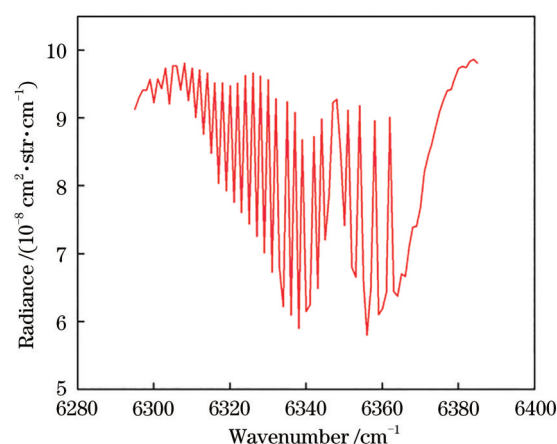


图2 仿真 $1.58\text{ }\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ 吸收带辐亮度谱

Fig. 2 Simulated radiance spectrum at the absorption zone of  $1.58\text{-}\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$

## 4 二氧化碳浓度反演的敏感性分析

大气辐射模型 MODTRAN4 可仿真太阳辐射经过大气吸收、散射等最终到达探测器的整个物理过程,所以遥感环境参数(如地表反射率、气溶胶光学厚度)都会影响 CO<sub>2</sub> 的探测精度<sup>[12]</sup>,根据 MODTRAN4 特点,分析了气溶胶模式和地表反射率对 CO<sub>2</sub> 探测的影响。

### 4.1 气溶胶对 CO<sub>2</sub> 探测的影响

气溶胶是一种固体或液体小颗粒,其大小为 0.001~100 μm,成分复杂,自然和人类活动都会造成气溶胶组成成分的差异,所以不同地区的气溶胶类型是不同的。MODTRAN4 提供的边界层气溶胶模式有无气溶胶、乡村(能见度 5 km 或 23 km)、城市(能见度 5 km 或 23 km)、对流层、海洋型等十多种气溶胶模式。选择三种典型气溶胶模式进行分析,包括海洋型(代表海洋大气边界层的情况)、乡村型(代表没有明显工业气溶胶的平均气溶胶条件)、城市型(代表了乡村型和煤烟型气溶胶的混合)。图 3 是三种气溶胶模式下 CO<sub>2</sub> 在 1.58 μm 吸收带波段的辐亮度光谱,CO<sub>2</sub> 体积比为 360×10<sup>-6</sup>。

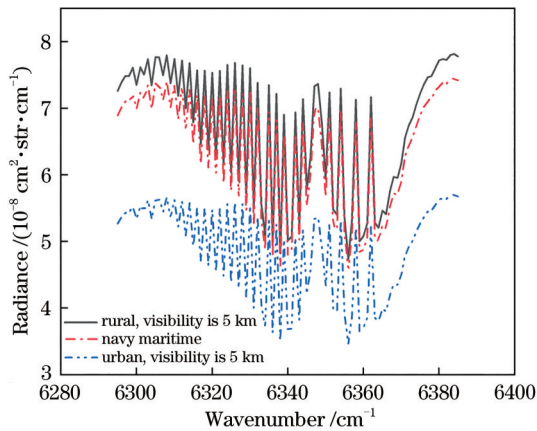


图 3 不同气溶胶下 1.58 μm CO<sub>2</sub> 吸收带辐亮度光谱  
Fig. 3 Radiance spectra at the absorption zone of 1.58-μm CO<sub>2</sub> under different aerosols

从图 3 可以看出,城市型气溶胶模式下,辐亮度是最弱的,其次是海洋型,而乡村型辐亮度相对较强。所以不同气溶胶类型中二氧化碳辐亮度变化是不一样的。但是,对于确定地区,其气溶胶模式相对稳定,可根据观测地区地理位置与周边地形分布确定合适的气溶胶模式,以此来减小气溶胶对二氧化碳反演的影响。另一方面,在反演二氧化碳过程中,可以通过先验知识或者 MODIS 等卫星产品

获取反演区域气溶胶光学厚度等参数,以减小气溶胶浓度不确定带来的影响。

### 4.2 地表反射率对 CO<sub>2</sub> 探测的影响

为了分析地表反射率对辐亮度的影响,选取二氧化碳吸收波段 1.567~1.587 μm,改变地表反射率的值,观察辐亮度变化。图 4 为地表反射率为 0.1~0.9 时所对应的辐亮度光谱,可以发现随反射率增加,辐亮度值也增加。

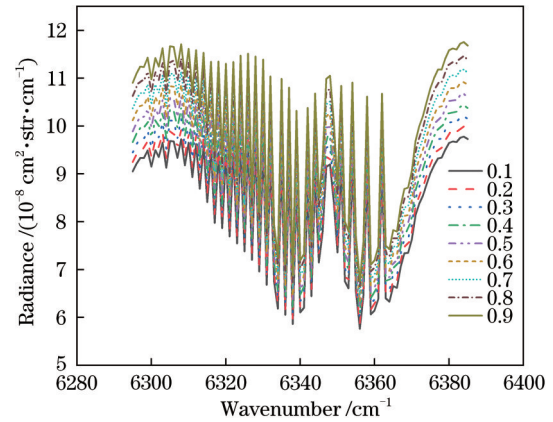


图 4 地表反射率为 0.1~0.9 时分别对应的 1.58 μm CO<sub>2</sub> 吸收带的辐亮度谱  
Fig. 4 Radiance spectra at the absorption zone of 1.58-μm CO<sub>2</sub> corresponding to surface reflectance 0.1-0.9 respectively

选取参考值为地表反射率 0.5 的二氧化碳辐亮度,然后计算不同反射率下的辐亮度值与参考值的差值比例<sup>[5]</sup>,结果如表 1 所示。可以看出,地表反射率对光谱辐亮度影响较大,地表反射率每隔 0.1,差值比例相差大约 2%,并且地表组成复杂,很难得到准确的反射率。为了消除地表反射率对辐亮度的影响,利用辐亮度比值法对仿真辐亮度数据进行处理分析,研究辐亮度比值与二氧化碳浓度之间的关系,并且根据该关系反演二氧化碳浓度。

表 1 不同反射率的差值比例

Table 1 Difference ratio of different reflectivity

Reflectivity	Differential ratio / %
0.1	-8.03
0.2	-6.15
0.3	-4.19
0.4	-2.15
0.5	0
0.6	2.25
0.7	4.61
0.8	7.09
0.9	9.71

## 5 比值法原理

假设观测辐亮度与地表反射率近似成线性,则观测辐亮度可表示为

$$I_v = \gamma'_v(\theta_0, \theta) I_{v0} \omega_0 \exp(-m\tau_{\text{CO}_2-v}) \cdot \exp(-m\tau_{\text{other-v}}), \quad (2)$$

式中:  $\gamma'_v(\theta_0, \theta)$  是地表反射率;  $\theta_0$  为太阳天顶角;  $\theta$  为卫星观测天顶角;  $I_{v0}$  为大气顶太阳辐亮度;  $m$  为大气质量因子, 表示为  $\sec \theta_0 + \sec \theta$ ;  $\tau_{\text{other-v}}$  是其他吸收气体及气溶胶光学厚度;  $\tau_{\text{CO}_2-v}$  是  $\text{CO}_2$  光学厚度。

在(2)式成立情况下, 选取光谱曲线中两相邻的谷-峰值  $V_j$  和  $V_{j0}$ , 如图 5 所示, 这两者所对应的大气状态、地表特征和仪器性能近似相同, 它们相比可以抵消地表反射率影响<sup>[13]</sup>。辐亮度谱吸收峰最高点  $V_{j0}$  是二氧化碳弱吸收的地方, 最低点  $V_j$  是二氧化碳强吸收的地方。辐亮度比值为

$$X_j = I_j/I_{j0} = \exp[-m(\tau_{\text{CO}_2-j} - \tau_{\text{CO}_2-j0})] \cdot \exp[-m(\tau_{\text{other-j}} - \tau_{\text{other-j0}})] (I_{\text{solar}_j}/I_{\text{solar}_j0}). \quad (3)$$

从(3)式可以看出, 在光谱比值法中约掉了反射率, 消除了地表反射率对二氧化碳反演的影响。在(3)式中, 太阳光谱本身以及其他吸收物质同样存在不确定性, 但在进行波段选择时, 已减小了其他吸收物质的影响。

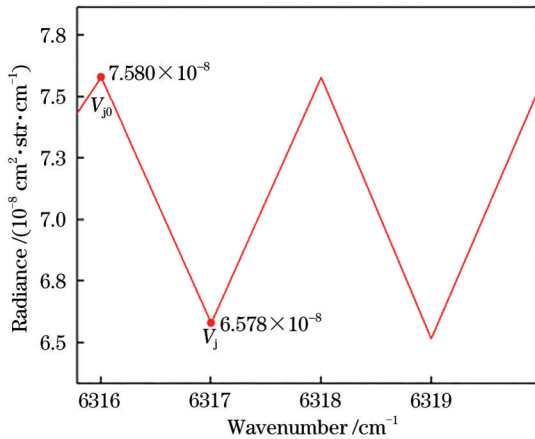


图 5 比值法示意图

Fig. 5 Diagram of ratio method

## 6 数据分析

根据以上讨论, 在 MODTRAN4 中输入参数, 仿真出辐亮度光谱, 并取不同地表反射率, 观察光谱辐亮度比值与二氧化碳浓度的对应关系。由图 2 可以看出,  $6300 \text{ cm}^{-1} \sim 6380 \text{ cm}^{-1}$  之间有很多吸收峰, 不利于定性分析, 为了找出相应的定量关系, 以

便更好分析辐亮度比值法与二氧化碳浓度之间的关系, 选择了  $6310, 6323, 6334, 6354 \text{ cm}^{-1}$  四个吸收谷-峰比值与二氧化碳浓度进行拟合分析。

由图 6 可以看出, 观测点基本在拟合曲线附近, 说明随着二氧化碳浓度的增加, 在不同地表反射率情况下, 吸收峰最低点和最高点的比值都随之减小, 呈线性下降趋势。以上结果并不是  $6310 \text{ cm}^{-1}$  波数的特例, 其他三个波数也具有相同结果, 只是不同波数拟合结果的斜率有所不同。并且 4 个吸收峰辐亮度比值与二氧化碳浓度的相关系数均达到 0.98 以上, 说明辐亮度比值和二氧化碳浓度具有高度相关性, 平均误差为  $2.13\% \sim 0.94\%$ 。不同反射率下, 在相同波数附近的辐亮度比值与二氧化碳浓度拟合的斜率都比较相近。

为进一步分析, 对不同地表反射率条件的拟合值进行平均处理, 结果如表 2 所示。可知无论在何种反射率下, 光谱辐亮度比值与二氧化碳浓度都呈高度相关, 并且平均误差小于等于  $2\%$ , 在  $6310 \text{ cm}^{-1}$  吸收峰的辐亮度比值与二氧化碳浓度的平均误差最小, 仅有  $1.15\%$ , 且相关系数  $R$  高达 0.996, 二者相关性最好, 可用此吸收峰作为特征波数对二氧化碳浓度进行反演。

上面的研究是在中纬度冬季大气模式、乡村型气溶胶模式、能见度为 5 km 的条件下进行的, 为了使研究结果更具普遍性和说服力, 还对其他大气模式和气溶胶模式进行了分析。分别对中纬度夏季、美国标准大气和海洋型气溶胶、城市型气溶胶、乡村型气溶胶的情况进行类似定量分析, 以  $6310 \text{ cm}^{-1}$  位置吸收峰最低点和最高点的比值作为响应结果, 分析辐亮度与二氧化碳浓度的对应关系, 结果如表 3 所示。可以看出不同的大气模式以及气溶胶模式下, 吸收峰的辐亮度比值与二氧化碳浓度都体现出线性关系, 相关系数高达 0.979 以上, 平均误差都在  $1.5\%$  以下。

为验证仿真数据、模型的有效性, 使用中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室提供的空间外差光谱仪测量的二氧化碳实测数据进行对比。数据测量装置包括: 光源、二氧化碳吸收池、空间外差光谱仪。空间外差光谱仪主要参数如表 4 所示。测量时二氧化碳吸收池内充入纯的二氧化碳气体, 浓度以气压表示, 测量数据包含 0 到 1 个大气压条件下的 5 组数据。图 7 显示了不同二氧化碳浓度下光谱仪测量到的透过率光谱。可以看出, 随着

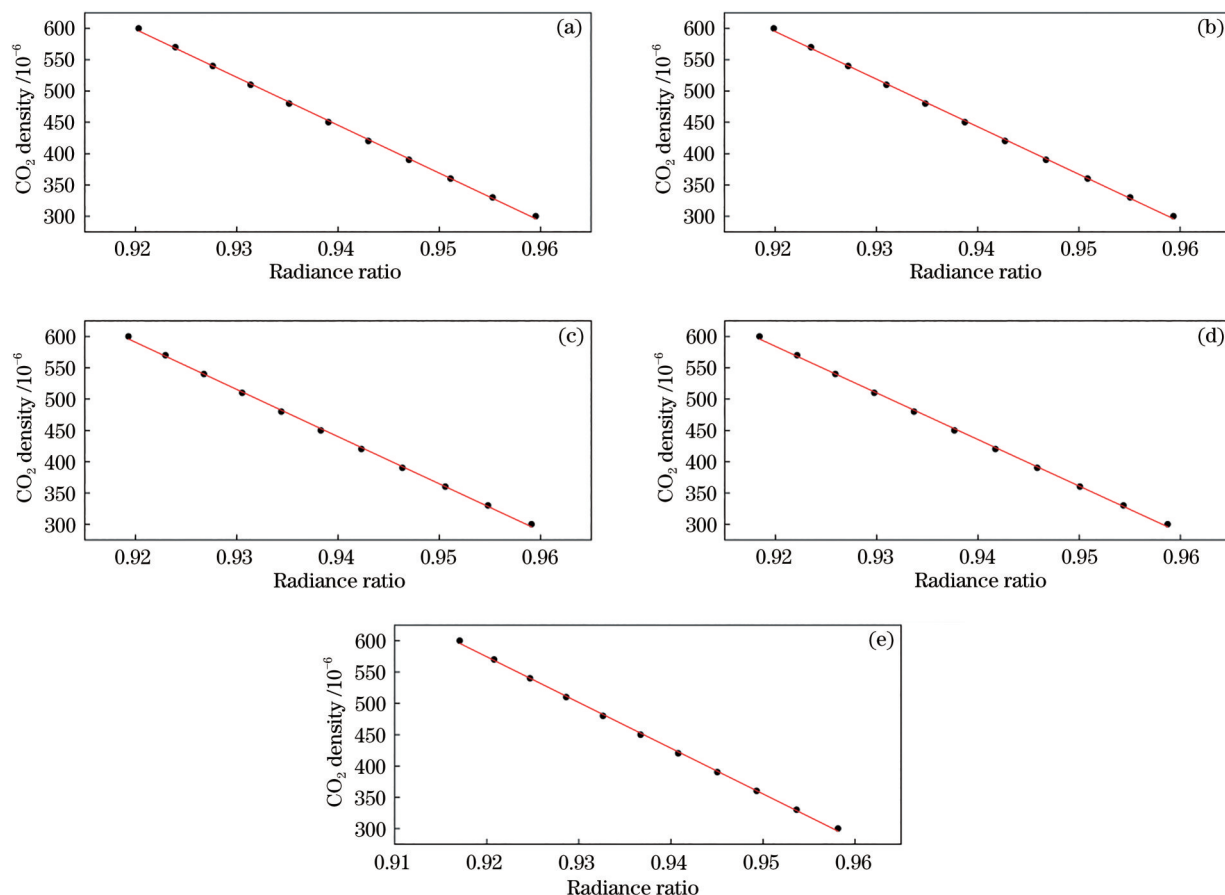


图 6 不同地表反射率下 6310 cm<sup>-1</sup>吸收峰附近光谱辐亮度比值与二氧化碳浓度的拟合结果。(a) 0.05;(b) 0.16;(c) 0.3;(d) 0.5;(e) 0.8

Fig. 6 Fitting results between spectral radiance ratios and carbon dioxide concentration near 6310 cm<sup>-1</sup> absorption peaks at different surface reflectivity. (a) 0.05; (b) 0.16; (c) 0.3; (d) 0.5; (e) 0.8

表 2 不同波数的地表反射率平均拟合结果

Table 2 Average fitting results of surface reflectivity with different wavenumbers

Wavenumber /cm <sup>-1</sup>	Model	R	Average error /%
6310	$Y = -5693.47397 \times X + 5628.92276$	-0.996	1.15
6323	$Y = -3212.74973 \times X + 2838.50017$	-0.983	1.47
6334	$Y = -2692.12499 \times X + 2131.76557$	-0.985	1.81
6354	$Y = -2211.6141 \times X + 1773.44557$	-0.940	1.64

表 3 不同大气模式、气溶胶下的平均拟合结果

Table 3 Mean fitting results of different atmospheric models and aerosols

Atmospheric model	Model	R	Average error /%
Midlatitude summer	$Y = -5753.547 \times X + 5747.306$	-0.992	1.43
1976 US standard	$Y = -5558.7 \times X + 5533.371$	-0.994	1.22
Rural, visibility is 5 km	$Y = -5693.474 \times X + 5628.923$	-0.996	1.15
Navy maritime	$Y = -5703.95 \times X + 5638.444$	-0.979	1.21
Urban, visibility is 5 km	$Y = -5749.289 \times X + 5686.76$	-0.990	1.32

吸收池内二氧化碳浓度的增加,各吸收峰深度变大,说明吸收越明显,光谱曲线基本轮廓与图2仿真辐亮度谱基本一致,但是由于空间外差光谱仪的光谱分辨

率更高,故实测数据的吸收峰宽度更窄、数量更多。

为与仿真数据对应,在实测光谱中选取 6310, 6323, 6334, 6354 cm<sup>-1</sup> 四个波数附近的波谷与波峰

表 4 空间外差光谱仪技术指标

Table 4 Technical index of space heterodyne spectrometer

Parameter	Value
Spectral resolution / $\text{cm}^{-1}$	0.27
Spectral range / $\text{cm}^{-1}$	6 325-6 360
Signal to noise ratio	300
Detection of pixels	$320 \times 25, 630 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$

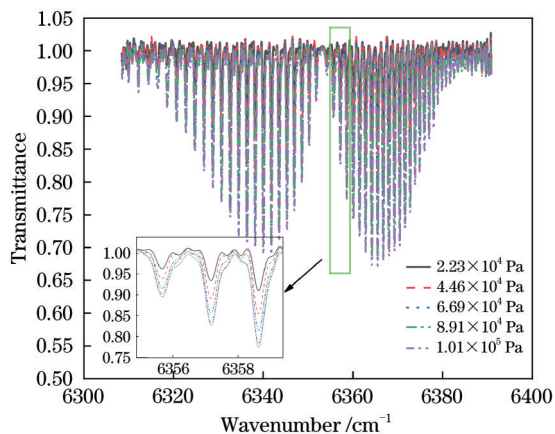


图 7 实测不同浓度的二氧化碳透过率光谱

Fig. 7 Measured transmittance spectra of different  $\text{CO}_2$  concentrations

比值与  $\text{CO}_2$  浓度进行拟合。结果显示,在  $6310 \text{ cm}^{-1}$  波段,透过率比值与  $\text{CO}_2$  浓度线性关系较差,主要原因是该波段的光吸收对二氧化碳的敏感度较低,噪声的影响更为明显。从图 7 可以看出,该波段的二氧化碳吸收峰深度很小,故误差较大。但在其他三个波段,透过率比值与  $\text{CO}_2$  浓度为线性关系,相关系数均达到 0.95 以上,与仿真结果曲线趋势一致。其中  $6334 \text{ cm}^{-1}$  波段的拟合线性效果最好,如图 8 所

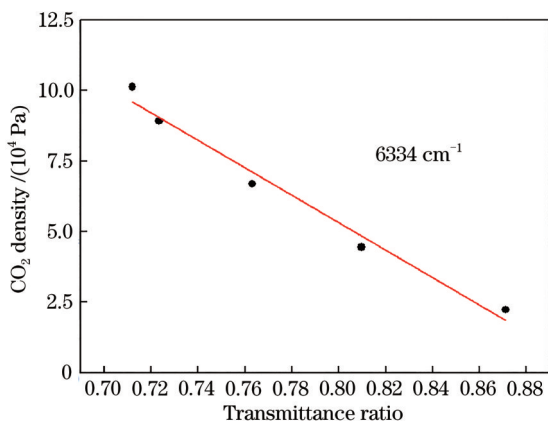


图 8 实测数据透过率光谱比值与二氧化碳浓度的线性拟合结果

Fig. 8 Linear fitting result between transmittance spectral ratio of measured data and carbon dioxide concentration

示,透过率比值与  $\text{CO}_2$  浓度的相关系数达到了 0.99,验证了仿真数据的模型结果。

## 7 结 论

地表反射率和卫星观测精度都会对二氧化碳浓度反演造成影响,其中对二氧化碳浓度反演影响较大的是地表反射率。为了消除地表反射率不确定的影响,提出利用辐亮度比值的二氧化碳浓度反演方法。在辐射传输模型中输入参数,设置不同的地表反射率,仿真出卫星入瞳处辐亮度光谱。选取辐亮度光谱吸收峰的谷-峰比值与二氧化碳浓度进行分析,最后与实测数据进行对比。结果显示辐亮度比值与二氧化碳浓度存在线性关系,相关系数高达 0.98,拟合平均误差小于等于 2%。利用该关系,可以在不考虑地表反射率影响的情况下,方便反演出二氧化碳浓度。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0514003.  
李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514003.
- [2] Zhao Q C. Development of a mid-infrared methane and carbon dioxide dual-gas sensor system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2330001.  
赵庆川. 中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统的研制[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2330001.
- [3] Liu D D, Huang Y B, Cao Z S, et al. Analysis of total columns of greenhouse gas based on direct observation and comparison with satellite data in Hefei [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 0301002.  
刘丹丹, 黄印博, 曹振松, 等. 合肥地区温室气体柱浓度直接观测与卫星数据对比分析[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 0301002.
- [4] Aben I, Hasekamp O, Hartmann W. Uncertainties in the space-based measurements of  $\text{CO}_2$  columns due to scattering in the Earth's atmosphere[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 104(3): 450-459.
- [5] Ye S, Gan Y Y, Xiong W, et al. Sensitivity analysis of carbon dioxide based on SCIATRAN[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 0717006.  
叶松, 甘永莹, 熊伟, 等. 基于 SCIATRAN 模型的

- 大气 CO<sub>2</sub> 敏感性分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0717006.
- [6] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, 1977.
- [7] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977-998.
- [8] Deering D W, Eck T F, Banerjee B. Characterization of the reflectance anisotropy of three boreal forest canopies in spring-summer[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 67(2): 205-229.
- [9] Zhao C Y, Zhang Y N, Wei W, et al. Absolute radiometric calibration method based on surface hyperspectral BRDF model[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 0528001.  
赵春艳, 张艳娜, 韦玮, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的绝对辐射定标方法[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 0528001.
- [10] Wu H, Wang X H, Ye H H, et al. Retrieval algorithm of atmospheric CO<sub>2</sub> for urban underlying surface in Beijing[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(6): 1223-1231.  
吴浩, 王先华, 叶函函, 等. 北京城市下垫面大气 CO<sub>2</sub> 反演算法[J]. 遥感学报, 2019, 23(6): 1223-1231.
- [11] Rodgers C D. Inverse methods for atmospheric sounding[M]. Singapore: World Scientific, 2000.
- [12] Jiang Y, Ye H H, Wang X H, et al. Correction of effect of plant chlorophyll fluorescence based on optical path distribution method[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0401002.  
蒋芸, 叶函函, 王先华, 等. 基于光程分布方法校正植物叶绿素荧光的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0401002.
- [13] Christi M J, Stephens G L. Retrieving profiles of atmospheric CO<sub>2</sub> in clear sky and in the presence of thin cloud using spectroscopy from the near and thermal infrared: a preliminary case study[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D4): D04316.