

# 大气 CO<sub>2</sub> 反演误差分析与精度验证

李勤勤<sup>1,2</sup>, 王先华<sup>1\*</sup>, 叶函函<sup>1</sup>, 吴时超<sup>1,2</sup>, 李超<sup>1,2</sup>, 王晓迪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学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;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 搭载于高分五号卫星平台的大气主要温室气体监测仪(GMI)主要用于测量大气温室气体 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的柱浓度。为保证 GMI 遥感数据温室气体的反演精度,需分析温室气体反演中气溶胶等因素对反演结果的影响,并以此作为反演算法校正的要素。在此基础上,利用全球总碳柱观测网(TCCON)站点对 GMI 反演结果进行验证。结果表明,GMI 近红外反演结果误差范围为  $-1.06 \pm 2.93 \times 10^{-6}$  ( $-0.26 \pm 0.72\%$ ),反演精度在 1% 以内。

**关键词** 大气光学; 温室气体监测仪; 总碳柱观测网; 反演; 验证

中图分类号 P407

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0601003

## Atmospheric CO<sub>2</sub> Inversion Error Analysis and Accuracy Verification

Li Qinqin<sup>1,2</sup>, Wang Xianhua<sup>1\*</sup>, Ye Hanhan<sup>1</sup>, Wu Shichao<sup>1,2</sup>, Li Chao<sup>1,2</sup>, Wang Xiaodi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** In this study, the atmosphere major greenhouse-gases monitor instrument (GMI) loaded on the GF-5 satellite platform is used to measure the column concentration of atmospheric greenhouse gases CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. To ensure the accuracy of the greenhouse gas inversion in GMI remote sensing data, the influence of aerosol and other factors in greenhouse gas inversion on inversion results is analyzed and used as the correction factor of the inversion algorithm. Given this, the GMI inversion results are verified using the total carbon column observing network (TCCON) site. Furthermore, results show that the GMI near-infrared inversion results exhibit a low bias with  $-1.06 \pm 2.93 \times 10^{-6}$  ( $-0.26 \pm 0.72\%$ ), and the inversion accuracy is within 1%.

**Key words** atmospheric optics; greenhouse-gases monitor instrument; total carbon column observing network; inversion; verification

**OCIS codes** 010.1290; 280.1310; 280.1100

## 1 引 言

CO<sub>2</sub> 作为主要的温室气体<sup>[1]</sup>, 是引起气候变化的重要因素。为了精确地预测未来 CO<sub>2</sub> 对气候的影响,需要很高的 CO<sub>2</sub> 测量精度,一般认为 CO<sub>2</sub> 柱平均干空气体积混合比(XCO<sub>2</sub>)的观测精度必须达到 0.3%~0.5%<sup>[2]</sup>,传统的 CO<sub>2</sub> 浓度测量主要依赖于地面监测网络,虽然地基观测 CO<sub>2</sub> 方法具有精度高、可靠性强的优点,但为单点测量,无法进行全球大范围内地观测<sup>[3]</sup>,尤其在广阔的海洋、高山、极地等地区的观测资料很少。因此,CO<sub>2</sub> 卫星遥感探测技术

已成为评估全球变暖趋势的一个重要技术手段。

高分五号卫星于 2018 年 5 月 9 日成功发射,其上搭载的大气主要温室气体监测仪(GMI)是用于监测温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 的载荷。GMI 采用空间外差光谱(SHS)技术<sup>[4]</sup>,该技术继承了傅里叶变换光谱仪的优点,同时也兼具光栅光谱仪的优点,尤其适用于卫星遥感观测平台。GMI 的主要任务是获取 0.76 μm(O<sub>2</sub> A 波段)、1.58 μm(CO<sub>2</sub> 弱吸收波段)、1.64 μm(CH<sub>4</sub> 波段)、2.00 μm(CO<sub>2</sub> 强吸收波段)等谱段的高光谱遥感探测数据。为此,开发了基于 GMI 遥感进行温室气体反演的算法与软件。GMI

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-27; 录用日期: 2019-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0504000, 2017YFB0504001)、高分辨对地观测系统重大专项(民用部分)(32-Y20A17-9001-15/17)、国家自然科学基金(41601393)、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)

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

作为一种新型的卫星遥感器,其遥感过程所受的影响因素和影响程度有其自身特殊性,为保证反演结果的应用效果,在反演算法上需对遥感过程中主要干扰因素影响进行相关的校正,然而如何保证校正的效果,需要利用更高精度的测量结果如全球总碳柱观测网(TCCON)进行验证。

目前,国外在轨运行的温室气体监测卫星有日本的 GOSAT 卫星和美国的 OCO-2 卫星。Yoshida 等<sup>[5]</sup>和 Uchino 等<sup>[6]</sup>发现在利用 GOSAT 数据反演时很多因素可以导致系统误差,包括气溶胶光学厚度(AOD)、地表气压  $P$ 。这些环境参量偏差会导致  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  反演结果存在较大误差<sup>[7-9]</sup>。Connor 等<sup>[10]</sup>在对 OCO 数据进行误差分析时,研究了气溶胶光学厚度、地表压力、温度等因素的影响。为客观地比较反演结果,Inoue 等<sup>[11]</sup>和 Cogan 等<sup>[12]</sup>以 TCCON 数据为参考值,在对 GOSAT 卫星进行误差校正时,发现气溶胶光学厚度、反射率、压力对反演误差的影响很大。TCCON 是全球温室气体柱含量监测站,具有极高的测量精度和验证全球温室气体遥感结果的能力。在进行地基与卫星数据匹配时,最理想的状态是将卫星载荷和地基站点在同一地点、同一时刻探测的数据进行匹配。但是在实际情况下采用上述方法匹配出来的数据点非常少,为了获得更多的数据使得统计学分析有意义,需要按照一定的经纬度范围和一定的时间范围进行数据匹配。Wunch 等<sup>[13]</sup>选择 TCCON 地基站点纬度  $10^\circ$  之内,经度  $30^\circ$  之内,北半球对流层 700 hPa 高度上位温 2 K 之内的数据对 GOSAT 与地基数据进行空间上的匹配。Cogan 等<sup>[12]</sup>以站点为中心,经纬度  $5^\circ$  以内,时间为卫星过境前后 2 h,选择南北半球 8 个站点附近的数据进行验证。地面站点和卫星观测点在空间上的差异,导致他们之间在地表特性、大气环境、甚至温室气体本身的差异,因此如何克服这种差异带来的误差,提高 TCCON 验证的准确性,已成为 GMI 验证工作需要解决的关键问题。本文针对高分五号卫星的 GMI 载荷,利用开发的温室气体反演算法,在充分考虑影响因素的基础上开展了基于

GMI 数据的误差分析和精度验证研究,力求实现高分五号卫星  $\text{CO}_2$  高精度的遥感监测能力。

## 2 反演原理与方法

GMI  $\text{XCO}_2$  反演算法采用最优估计理论<sup>[14]</sup>。从卫星测量的短波红外高光谱数据反演  $\text{XCO}_2$ ,卫星传感器接收到的测量值  $\mathbf{y}$  由完整的大气状态、成分含量及仪器参数确定,观测物理量与待求大气参数的变化关系表示为

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

式中: $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b})$ 本质上为正向辐射传输模式; $\mathbf{x}$ 为待反演的状态向量; $\mathbf{b}$ 为影响辐射传输的大气参数向量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为误差向量。通常采用最优估计的最大后验概率密度来进行处理,定义代价函数为

$$\chi^2 = [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_\varepsilon [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{y}$ 为观测向量; $\mathbf{S}_\varepsilon$ 为观测误差协方差,应包括仪器噪声、前向模型误差和大气干扰; $\mathbf{x}_a$ 为待求的状态向量初始值; $\mathbf{S}_a$ 为先验协方差矩阵。反演大气参数的问题就等价于寻找代价函数的最小值,采用的高斯牛顿迭代法为

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + (\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K}_i + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \cdot \{\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_i)] - \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a)\}, \quad (3)$$

式中:下标  $i$  为第  $i$  次迭代; $\mathbf{K}$  为雅可比矩阵(权重函数)。

事实上,对  $\text{CO}_2$  反演的过程,就是基于卫星遥感特性的大气、地表等环境参量的迭代过程。环境参量的影响程度是确定反演算法设计的基础,而对反演结果的检测,则反映算法的有效性,是反演算法改进和优化的基础。美国 OCO-2 反演算法已经更新到第 9 代并仍在优化中,其原因即在于此。

## 3 大气 $\text{CO}_2$ 误差分析

针对高分五号卫星 GMI 的遥感特性开发了温室气体反演方法,地表气压、大气温度廓线  $T(p)$ 、地表反照率以及气溶胶等是  $\text{CO}_2$  反演的主要影响因素。GMI 主要的技术参数如表 1 所示。

表 1 GMI 主要的技术参数

Table 1 Main technical parameters of GMI

Band	Band-1	Band-2	Band-3	Band-4
Spectral range / $\text{cm}^{-1}$	13004–13175	6317.1–6377.6	6031.4–6090.1	4859.1–3894.8
Sampling interval / $\text{cm}^{-1}$	0.020	0.003	0.007	0.004
Spectral resolution / $\text{cm}^{-1}$	0.60		0.27	
Signal to noise ratio	300	300	250	250

以标准大气为基本条件,CO<sub>2</sub>浓度(体积比)约为400×10<sup>-6</sup>,模拟研究不同气溶胶类型、反射率、大气温度廓线、地表气压、地表反射率对CO<sub>2</sub>反演结果的影响。

### 3.1 气溶胶、反射率、太阳天顶角参数的影响

利用SCIATRAN模型,模拟典型陆地条件下气溶胶模型对CO<sub>2</sub>反演精度影响,各个因素的变化范围如表2所示。

不同反射率条件下气溶胶散射对XCO<sub>2</sub>反演的影响如图1所示。纵坐标表示不同反射率条件下,

气溶胶光学厚度变化导致的CO<sub>2</sub>柱浓度反演差值。

表2 用于模拟研究的因素变化范围

Table 2 Variation range of factors used for simulation study

Parameter	Range of variation
Solar zenith angle / (°)	30
Observation zenith angle / (°)	0
Aerosol model	Rural, urban
AOD(0.55 μm)	0.01,0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30
Surface reflectance	0.05,0.10,0.20,0.30,0.60

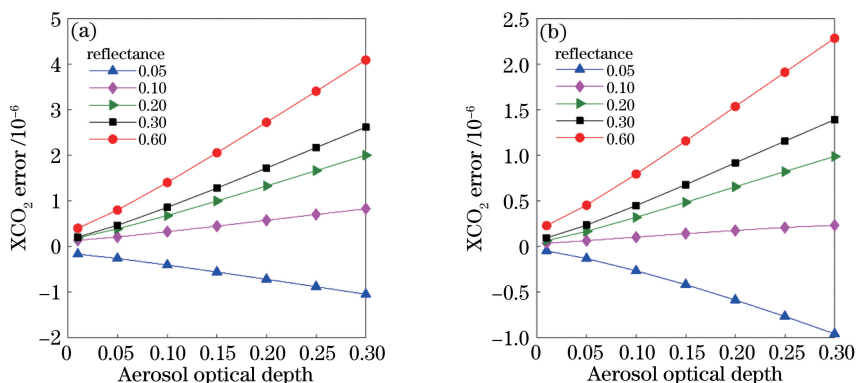


图1 不同反射率条件下气溶胶散射对XCO<sub>2</sub>反演的影响。(a)乡村型;(b)城市型

Fig. 1 Effect of aerosol scattering on XCO<sub>2</sub> inversion under different reflectance conditions. (a) Rural; (b) urban

在乡村型或城市型气溶胶模式下,在暗地表条件下,XCO<sub>2</sub>都被低估,当反射率大于0.30时,XCO<sub>2</sub>被高估。当太阳天顶角一定时,随着气溶胶光学厚度的增大,反演误差在增大。暗地表的反演误差低于亮地表。城市型气溶胶的反演误差低于乡村型。

表3 各参数及其扰动量

Table 3 Parameters and perturbation quantity

Parameter	Perturbation quantity							
Surface atmospheric pressure / %	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	-3.5		
Atmospheric temperature profile / K	±0.5	±1	±1.5	±2	±2.5	±3		
Surface reflectance	-0.25	-0.20	-0.10	0	0.10	0.20	0.30	0.35

大气温度廓线对XCO<sub>2</sub>反演结果的影响如图2所示。当反演所需的大气温度廓线高于实际的大气温度廓线时,XCO<sub>2</sub>反演结果偏大;当反演所需的大气温度廓线小于实际的大气温度廓线时,XCO<sub>2</sub>反演结果偏小。随着气温扰动量的增大,XCO<sub>2</sub>反演结果误差也在增大。当气温扰动量达到1K时,反演偏差的绝对值接近0.5×10<sup>-6</sup>。

地表气压对XCO<sub>2</sub>反演结果的影响如图3所示。当实际地表气压小于反演所需的地表气压时,CO<sub>2</sub>反演结果偏小。随着地表气压扰动量的增

### 3.2 大气温度廓线、地表气压、地表反射率参数影响

大气温度廓线系数反映了整层大气垂直变化的情况,对CO<sub>2</sub>柱含量XCO<sub>2</sub>具有重要的影响,其中气压和大气温度是两项重要因素。各个参数的扰动量如表3所示。

加,CO<sub>2</sub>的反演误差增加,从图3可以看出,地表气压对CO<sub>2</sub>反演结果的影响较大,当地表气压的扰动量为1%时,反演误差可达0.4×10<sup>-6</sup>。

地表反射辐射会由大气后向散射反射到地面,并由地面再次反射到大气中,这种地面与大气的耦合作用拉长了光辐射在大气中传输的过程,地表反射率越大,耦合作用越大,这种作用改变了CO<sub>2</sub>对光辐射的强度。

卫星传感器接收到的辐射信号由地表反射和大气反射构成,所以对卫星观测的辐射量来说,地表辐

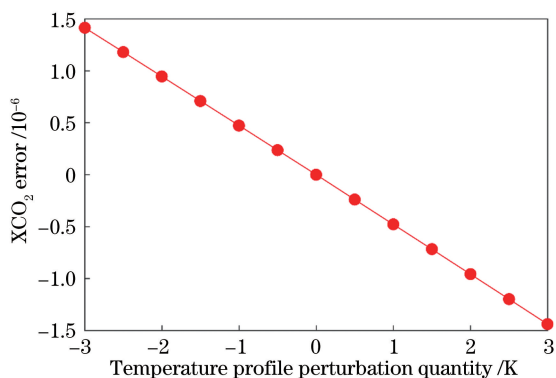


图 2 大气温度廓线造成的 XCO<sub>2</sub> 反演误差

Fig. 2 XCO<sub>2</sub> inversion error caused by atmospheric temperature profile

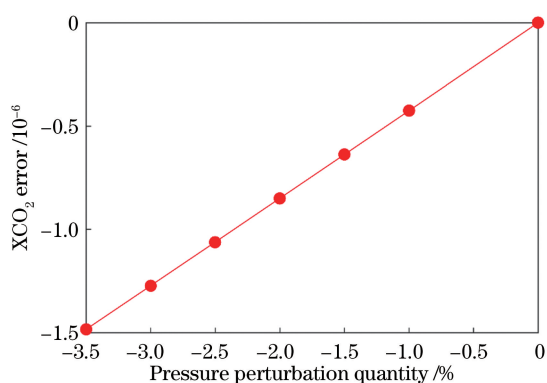


图 3 地表气压造成的 XCO<sub>2</sub> 反演误差

Fig. 3 XCO<sub>2</sub> inversion error caused by surface atmospheric pressure

射占很大一部分,即地表反射率对 XCO<sub>2</sub> 反演具有较大的影响。然而在反演过程中,通常采用模拟光谱与测量光谱匹配技术,这一过程可以很好地校正反演率误差对反演的影响,因此为体现反射率误差的影响,可以以较大的误差进行模拟。以反射率为 0.3 为例,不同地表反射率误差对 XCO<sub>2</sub> 的反演结果影响如图 4 所示。

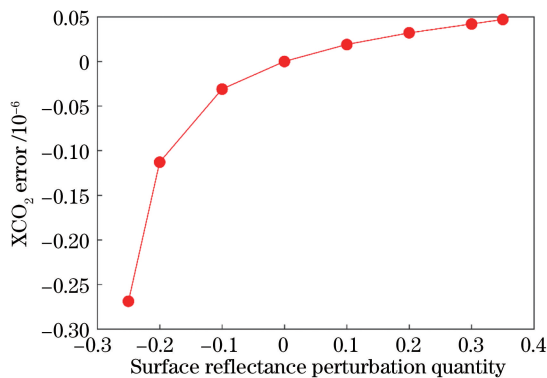


图 4 地表反射率造成的 XCO<sub>2</sub> 反演误差

Fig. 4 XCO<sub>2</sub> inversion error caused by surface reflectance

通过改变近红外 CO<sub>2</sub> 波段的反射率值,可以看出,地表反射率对 CO<sub>2</sub> 反演结果的影响较小,当反射率低于 0.3 时,反演结果被低估,当反射率高于 0.3 时,反演结果被高估。反演误差最大可达到  $0.3 \times 10^{-6}$ 。

## 4 基于 TCCON 的 GMI 遥感数据反演结果的验证实验

### 4.1 TCCON 站点与 GMI 遥感测点的匹配

TCCON 是全球总碳柱观测网络,可以提供对温室气体浓度的长时间观测序列,为验证和改进卫星高光谱观测反演 CO<sub>2</sub> 浓度的重要数据源之一。GMI 为离散点采样方式,目前采用 -32, -16, 0, 16, 32 的轨交方向 5 点采样,GMI 采样图如图 5 所示。在中低纬地区,测点之间的间隔为 100 ~ 200 km,因此与 GOSAT、OCO-2 等同类卫星一样,GMI 遥感测点与 TCCON 站点难以从空间上完全匹配,实验中对数据的匹配需从时间、空间和数据匹配量上进行综合考虑。选取 2018 年 9 月份的陆地数据,在站点周围 5°,卫星过境前后 2 h 的数据来与 TCCON 站点数据进行匹配。南半球站点数量少,但南半球具有受到人为因素的干扰较小、CO<sub>2</sub> 空间分布较稳定的特点,实验中对 Lauder 站点的匹配范围拓宽到 10°。

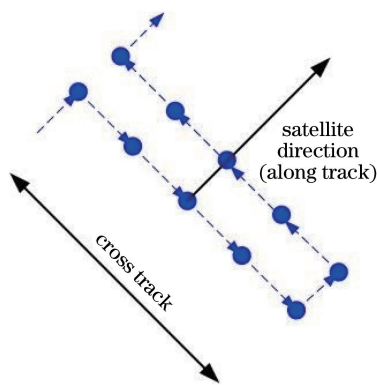


图 5 GMI 采样图

Fig. 5 GMI sample map

### 4.2 验证站点选取

TCCON 站点的数据更新有延迟,且有些站点已经不在运作。更新到九月份的 TCCON 各个站点的数据更新及运行情况如表 4 所示。

基于 TCCON 站点提供测量数据,考虑到空间分布均匀性,本文选取目前数据还在更新的 8 个 TCCON 地基站点,分别分布于亚洲、欧洲、北美洲、大洋洲。

表 4 九月份的 TCCON 各个站点的数据更新及运行情况  
Table 4 Data update and operation of TCCON sites in September

Site	Operational?	Description
Ascension_Island	No	Solar tracker has arrived in Germany for repairs
Caltech	Yes	
Edwards	Yes	
East Trout Lake	Yes	Sunlight blockage resolved
Eureka	Yes	Instrument aligned
Garmisch	Yes	operational
Izana	Yes	Normal mixed NIR-MIR operation
Karlsruhe	Yes	Instrument is operational, overpass operation possible during working days
Lamont	Yes	
Lauder	Yes	125 HR operational
Saga	Yes	Vacuum pump was repaired on January 5, 2016
Sodankyla	Yes	
Zugspitze	Yes	Operational
Park_Falls	Yes	

### 4.3 GMI 反演数据与 TCCON 站点验证对比分析

在选取的 8 个 TCCON 站点上,根据匹配原则挑选出符合条件的 TCCON 站点数据和 GMI 数据。

图 6 显示了 Karlsruhe 站点与 GMI 数据点匹配分布的局部放大图,其中大点表示站点位置,小点表示根据匹配原则匹配到的 GMI 探测点的数据。

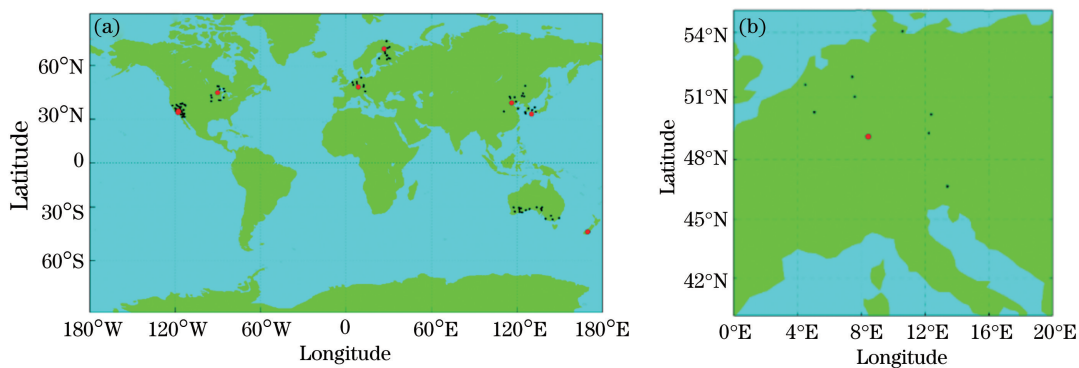


图 6 站点位置。(a) 8 个 TCCON 站点;(b) Karlsruhe 站点的局部放大图

Fig. 6 Sites location. (a) Eight TCCON sites; (b) partial enlargement of Karlsruhe site

由匹配分布图可以看出,数据点分布是离散的,两者距离较远,可能导致 GMI 探测点所处的环境条件与 TCCON 相差较大,所以需要预处理。由于对所有 TCCON 站点的数据与 GMI 的信息进行比对的篇幅太大,因此选择两个具有代表性的站点进行说明。例如,新西兰的 Lauder 站点是目前南半球数据仍在持续更新的站点,美国的 Edwards 站点表面存在相差较大的地表反射率。由上述模拟分析可知,地表气温、气压、地表反射率对

XCO<sub>2</sub> 的反演结果有影响,从 ECMWF (European center for medium-range weather forecasts)中提取 GMI 探测点与 TCCON 站点所对应的地表气温、气压,从 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)中提取反射率等信息,从而获得各参数的偏差值。图 7 和图 8 显示了 Lauder 站点和 Edwards 站点的地表气温、气压和反射率与 TCCON 站点的数据偏差图。纵坐标表示数据偏差的绝对值。

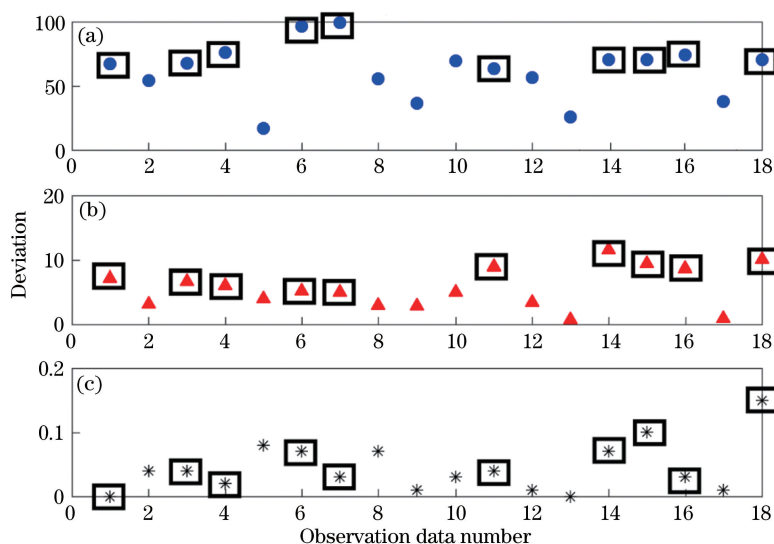


图 7 Lauder 站点与 TCCON 站点的数据偏差图。(a)气压偏差；(b)温度偏差；(c)反射率偏差

Fig. 7 Data deviation of Lauder site and the TCCON site. (a) Pressure deviation; (b) temperature deviation; (c) reflectance deviation

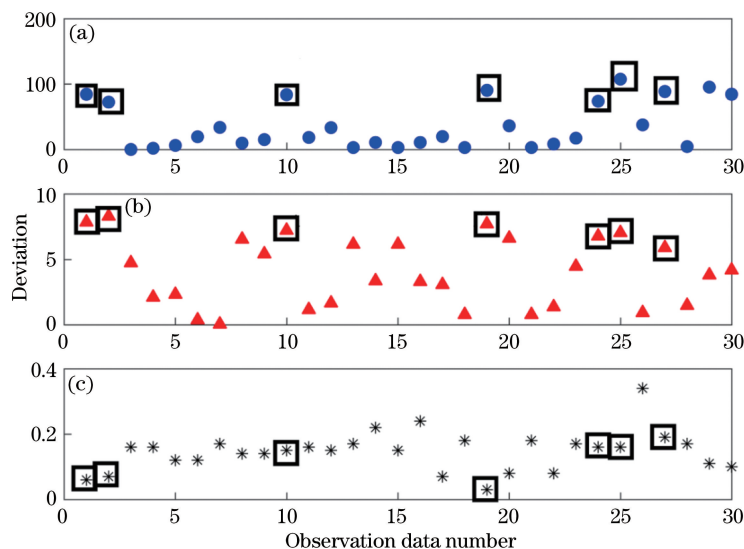


图 8 Edwards 站点与 TCCON 站点的数据偏差图。(a)气压偏差；(b)温度偏差；(c)反射率偏差

Fig. 8 Data deviation of Edwards site and the TCCON site. (a) Pressure deviation; (b) temperature deviation; (c) reflectance deviation

从图 7 和图 8 中可以看出,部分 GMI 探测点所处的大气、地表环境与 TCCON 差异较大。由模拟研究可得,地表反射率对反演结果的影响相对较小,在气压变化 1%,即 10 hPa 时,可造成  $0.4 \times 10^{-6}$  的误差,在大气温度变化 1 K 时,可造成  $0.5 \times 10^{-6}$  的误差。综合这两种影响因素对 XCO<sub>2</sub> 反演结果的影响,将气压大于 50 hPa 且地表气温大于 5 K 的 GMI 探测数据点去除,图 8 和图 9 中加框的点代表经过判断需要去除的点,以免除数据对验证精度的影响。

根据以上分析方法,在 GMI 九月份数据与

TCCON 匹配的结果中筛选出与 TCCON 站点大气环境和地表环境差距较大的数据点,并去除,得到 GMI 数据与 TCCON 各站点的数据差异。

表 5 总结了 GMI 数据与每一个地基数据的差异性,包括 GMI 与 TCCON 各站点数据的偏差平均值 average 以及标准偏差  $\sigma$ 。此处列出的数据数量表示在 GMI 过境 2 h 内收集了 g-b FTS 数据的有效案例数,并成功反演得到相应的 GMI XCO<sub>2</sub> 值,差异范围为  $-1.06 \pm 2.93 \times 10^{-6}$  ( $-0.26 \pm 0.72\%$ )。由表 5 也可知,在北半球,随着纬度的增加,反演精度变差,这可能是由于随着测点纬度的增加,其光谱

表 5 GMI 数据与 TCCON 各站点的数据差异  
Table 5 Difference of GMI data and TCCON data at each site

Site	Latitude /( $^{\circ}$ )	Number of data	Difference		Proportion of difference	
			Average / $10^{-6}$	$\sigma$ / $10^{-6}$	Average /%	$\sigma$ /%
Saga	33.24	2	-0.0704	1.6278	-0.02	0.40
Caltech	34.14	18	-2.5361	2.5200	-0.62	0.62
Edwards	34.96	24	-0.3447	2.4047	-0.09	0.59
Beijing	40.05	9	0.5545	2.8977	0.14	0.72
Park Falls	45.94	6	1.6167	2.6287	0.28	0.65
Karlsruhe	49.1	5	-1.0817	2.8937	-0.27	0.71
Sodankyla	67.37	6	-3.3496	3.1588	0.83	0.79
Lauder	-45.04	8	-2.2634	3.1802	-0.56	0.79
Total		78	-1.0639	2.9331	-0.26	0.72

Note: Different is the result of XCO<sub>2</sub> by GMI SWIR minus XCO<sub>2</sub> by g-b FTS; proportion of difference is obtained by dividing the aforementioned difference by XCO<sub>2</sub> by g-b FTS.

辐射强度不断减弱,遥感数据信噪比降低,导致反演结果的离散程度变大。而个别站点,比如 Beijing 站点受到复杂气溶胶等其他影响因素的干扰,反演精度较差。

## 5 结 论

模拟研究结果表明,无论是城市型还是乡村型气溶胶类型下,在暗地表时 XCO<sub>2</sub> 反演结果均被低估。在不同地表反射率条件下,随着气溶胶光学厚度的增加,XCO<sub>2</sub> 反演误差增大。气溶胶散射对 XCO<sub>2</sub> 反演结果影响较大,在反射率为 0.6 时,在乡村型气溶胶模式下,XCO<sub>2</sub> 反演误差最大可达  $4 \times 10^{-6}$ 。在研究地表反射率、地表气压及大气温度廓线影响时发现,地表气压、大气温度廓线对 XCO<sub>2</sub> 反演结果的影响大于地表反射率的影响。所以在实际反演过程中,需要准确的参数信息,以降低这些参数不准确所造成的反演误差。

将 TCCON 站点的 CO<sub>2</sub> 观测数据作为参考值,对 GMI 近红外光谱反演结果进行验证,表明,基于 GMI 遥感数据开发 CO<sub>2</sub> 反演误差范围为  $-1.06 \pm 2.93 \times 10^{-6}$  ( $-0.26 \pm 0.72\%$ ),基本满足 GMI 遥感的 1% 的精度要求。然而,本文是在 9 月份一个月数据基础上进行验证实验的,为保证更高的验证精度,应对 GMI 在轨运行过程中可能发生的变化,未来开展进一步的实验验证工作仍非常必要。

## 参 考 文 献

[1] Xiang L, Gao Q, Zhou S, et al. Comparisons of CO<sub>2</sub>

emission from fuel combustion among major countries and regions [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(5): 278-284.

[2] 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<sub>2</sub> 反演的影响及校正方法研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0901004.

[3] Schneising O, Buchwitz M, Reuter M, et al. Long-term analysis of carbon dioxide and methane column-averaged mole fractions retrieved from SCIAMACHY [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(6): 2863-2880.

[4] Wu J, Wang X H, Fang Y H, et al. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO<sub>2</sub> 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.

[5] Yoshida Y, Kikuchi N, Morino I, et al. Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(6): 1533-1547.

[6] Uchino O, Kikuchi N, Sakai T, et al. Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO<sub>2</sub>: a case study over Tsukuba [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12: 3393-3404.

- [7] Maksyutov S, Takagi H, Valsala V K, et al. Regional CO<sub>2</sub> flux estimates for 2009—2010 based on GOSAT and ground-based CO<sub>2</sub> observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(18): 9351-9373.
- [8] Deng F, Jones D B A, Henze D K, et al. Inferring regional sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub> from GOSAT XCO<sub>2</sub> data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(7): 3703-3727.
- [9] Jung Y, Kim J, Kim W, et al. Impact of aerosol property on the accuracy of a CO<sub>2</sub> retrieval algorithm from satellite remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 322.
- [10] Connor B J, Boesch H, Toon G, et al. Orbiting carbon observatory: inverse method and prospective error analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D5): D05305.
- [11] Inoue M, Morino I, Uchino O, et al. Bias corrections of GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(8): 3491-3512.
- [12] Cogan A J, Boesch H, Parker R J, et al. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the greenhouse gases observing SATellite (GOSAT): comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D21): D21301.
- [13] Wunch D, Wennberg P O, Toon G C, et al. A method for evaluating bias in global measurements of CO<sub>2</sub> total columns from space [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(23): 12317-12337.
- [14] Rodgers C D. *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice* [M]. Singapore: World Scientific, 2000.