

# 星载痕量气体差分吸收光谱仪 1 级数据质量评价

程良晓<sup>1,2</sup>, 陶金花<sup>1\*</sup>, 周海金<sup>3</sup>, 余超<sup>1</sup>, 范萌<sup>1</sup>, 王雅鹏<sup>4</sup>, 王志宝<sup>5</sup>, 陈良富<sup>1</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院/北京师范大学, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031
4. 国家卫星气象中心, 北京 100081
5. 东北石油大学计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318

**摘要** 星载痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)是我国第一台用于监测对流层和平流层痕量气体的高光谱分辨率成像光谱仪。为了充分了解载荷的特点,更好地利用 1 级数据进行痕量气体反演,本研究对 EMI 实测的辐照度和辐亮度数据进行了综合评价。研究表明 EMI 紫外 2 波段(UV2)和可见光 1 波段(VIS1)的狭缝函数都表现出明显的行依赖性,其随波动动的标准差是 OMI 和 TROPOMI 的 6 倍以上。对不同行采用不同的狭缝函数,可以提高辐照度光谱的定标精度,进而提高痕量气体反演精度。EMI 辐照度和辐亮度数据都有波长漂移现象,平均漂移量分别为 0.015 和 0.03 nm,有明显的行依赖性。目前的波长漂移量满足设计指标(0.05 nm)的要求,但在痕量气体反演过程中仍需进行波长精校准。EMI 辐照度数据与 OMI 和 TROPOMI 同一天测量的辐照度以及参考太阳光谱高度一致( $r > 0.95$ ),绝对偏差小于 4.3%;通过对比在洁净太平洋地区无云像元的平均辐亮度数据发现,EMI 与 OMI 和 TROPOMI 也有很好的一致性( $r > 0.93$ ),平均偏差小于 13.2%;说明 EMI 数据辐射定标精度较高。研究表明当前 EMI 载荷数据质量能够满足痕量气体反演的要求,可为后续国产载荷的研制和数据质量评估方案提供参考。

**关键词** GF-5; 星载痕量气体差分吸收光谱仪; 定标; 狭缝函数; 数据质量

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)12-3881-06

## 引言

2018 年 5 月 9 日 2 时 28 分,中国高分辨率对地观测重大专项中唯一一颗实现高光谱分辨率的对地观测卫星“高分五号”(GF-5)在太原卫星发射中心成功发射。在高分五号卫星所搭载的所有载荷中,痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)是中国第一台用于 NO<sub>2</sub> 等污染气体全球探测的高光谱载荷<sup>[1-2]</sup>,与全球臭氧监测仪(global ozone monitoring experiment 2, GOME2 instrument)<sup>[3]</sup>、臭氧监测仪(ozone monitoring instrument, OMI)<sup>[4]</sup>和对流层监测仪(TROPOspheric monitoring instrument, TROPOMI)<sup>[5]</sup>类似,可以为全球 NO<sub>2</sub> 等痕量气体的卫星监测技术提供新的发展机会和更大

的发展空间。

已有研究表明,对于上述覆盖紫外-可见光波段的高光谱载荷而言,探元狭缝函数随在轨运行时间的变化、仪器退化引起的信噪比变化等硬件问题都会影响 1 级产品的结果,进而影响 2 级产品的反演精度<sup>[6]</sup>。此外,1 级产品的辐射定标精度、光谱定标精度等数据质量问题又会给 2 级产品的反演引入较大的不确定性<sup>[7-9]</sup>。差分光学吸收光谱(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)反演算法,对波长校正精度非常敏感,即使很小的波长漂移( $\sim 0.002$  nm)也会给 NO<sub>2</sub> 的 SCD 拟合引入较大的不确定性<sup>[10-11]</sup>。因此,在 2 级产品生产时依然要在特定的波长窗口内执行波长校正<sup>[12-15]</sup>。为了更好地了解 EMI 载荷 1 级数据的现状,本研究对其 1 级数据进行评估。

收稿日期: 2020-11-17, 修订日期: 2021-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503901, 2018YFC0213901, 2018YFC0213904), 中国科学院战略先导专项(XDA19010403, XDA19040201), 国家自然科学基金项目(41771391), 东北石油大学优秀中青年科研创新团队项目(KYCXTD201903)资助

作者简介: 程良晓, 1991 年生, 中国科学院空天信息创新研究院博士研究生 e-mail: chenglx@radi.ac.cn

\* 通讯作者 e-mail: taojh@radi.ac.cn

## 1 实验部分

### 1.1 EMI 数据

EMI 是星下点推扫光谱仪, 具有两个紫外波段(UV1, UV2)和两个可见光波段(VIS1, VIS2)。每个波段都是一个二维面阵 CCD, 以 VIS1 波段为例(图 1), 空间维和光谱维分别具有 111(合并后)和 1 286 个探元, 每个探元都是属性相同但又相互独立的电子元件。其中, 空间维的每个像元分别对应不同的“行”; 位于中间位置的行对应于星下点观测, 位于两端的行分别对应于  $57^\circ$  的观测角。光谱维的像元分别对应不同的波长。

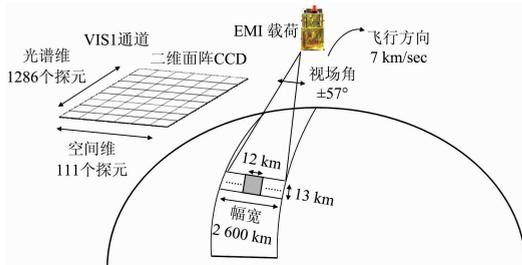


图 1 EMI VIS1 波段观测示意图

Fig. 1 Sketch map of EMI VIS1 band observation

### 1.2 光谱定标方法

辐照度数据的光谱定标是通过与高分辨率太阳光谱拟合来实现的。一般将整个定标区间划分为若干个子窗口, 根据式(1)对每个子窗口进行拟合来得到定标后的波长( $\lambda$ )

$$I_0(\lambda) = I_S(\lambda - \alpha - \beta(\lambda - \lambda_c)) \quad (1)$$

式(1)中,  $I_S$  是与仪器狭缝函数卷积之后的高分辨率太阳光谱<sup>[16]</sup>,  $I_0$  是实测辐照度数据,  $\alpha$  是波长漂移,  $\beta$  表示拉伸( $\beta > 0$ )或挤压( $\beta < 0$ ),  $\lambda_c$  是子窗口的中心波长。在 DOAS 算法中, 狭缝函数不但要与高分辨率太阳光谱进行卷积, 还要与

高分辨率气体吸收截面进行卷积。在辐照度光谱校正的过程中, 也可以通过式(2)拟合狭缝函数参数

$$I_0(\lambda) = L_a \otimes I_S(\lambda - \alpha - \beta(\lambda - \lambda_c)) \quad (2)$$

式(2)中,  $L_a$  是狭缝函数的线型, 一般用半峰全宽(FWHM)表征,  $\otimes$  是卷积符号。

为了评价 EMI 数据, 对 OMI 和 TROPOMI 数据也进行了分析。从 312~356 nm 的紫外波段范围内选择三个子窗口, 分别对应  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  和 HCHO 的常用反演窗口, 将  $\text{NO}_2$  常用的反演窗口(405~465 nm)对应的可见光波段范围划分为 3 个子窗口。子窗口的划分在表 1 中列出。

表 1 三种传感器不同波段的定标子窗口设置

Table 1 Sub-window settings for irradiance wavelength calibration

Subwindow	EMI UV2	OMI UV2	TROPOMI BAND3	EMI VIS1	OMI VIS	TROPOMI BAND4
1		312~326 nm		405~425 nm		
2		325~335 nm		425~445 nm		
3		327~356 nm		445~465 nm		

辐亮度数据的光谱定标方法是将波长漂移量作为参数在 DOAS 算法中进行考虑, 即

$$\ln\left(\frac{I(\lambda - \Delta(\lambda))}{I_0(\lambda)}\right) + \sum_{j=1}^n S^j(\lambda)c_j + P(\lambda) = 0 \quad (3)$$

式(1)中,  $I$  是实测辐亮度数据,  $\Delta(\lambda)$  是辐亮度的波长漂移量,  $I_0(\lambda)$  是经过光谱定标的实测辐照度,  $S^j$  是吸收成分  $j$  的斜柱浓度,  $c_j$  是对应的吸收截面,  $P(\lambda)$  表示低阶多项式。

## 2 结果与讨论

### 2.1 狭缝函数

图 2 分别展示了三个载荷辐照度数据在紫外(312~356

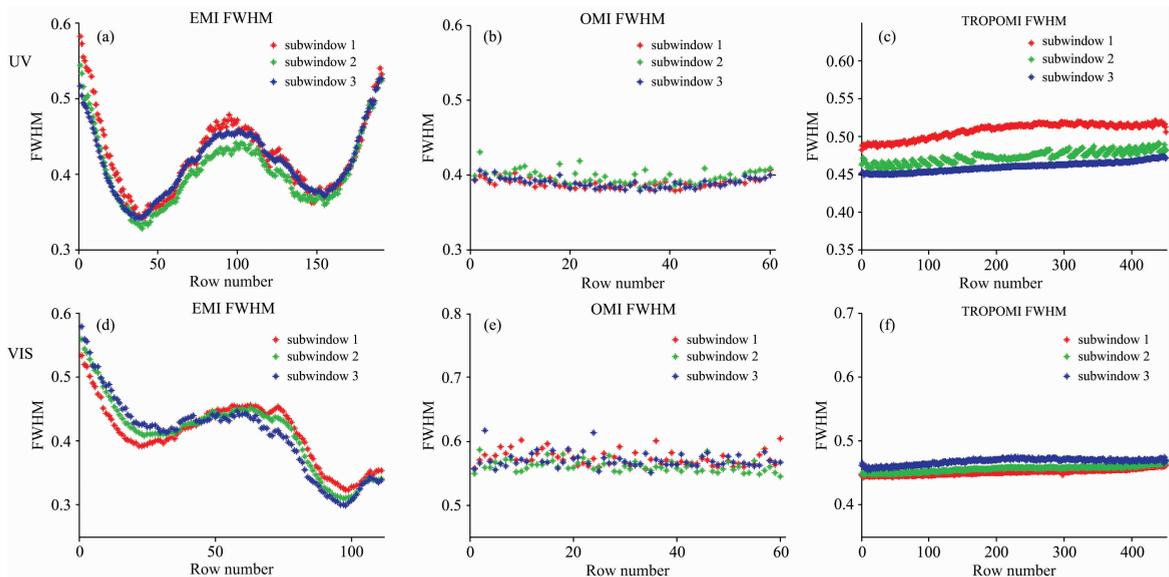


图 2 2018 年 6 月 12 日 EMI, OMI 和 TROPOMI 辐照度数据在紫外和可见光波段内三个子间隔的狭缝函数在跨轨道方向的变化

Fig. 2 Slit function of different sub-window in UV and VIS bands as a function of row

nm)和可见光(405~465 nm)波段的狭缝函数随行的变化。从图 2 可以看出,相比于 OMI 和 TROPOMI,EMI 狭缝函数随行变化剧烈,表现出“w”型特征。EMI UV2 波段的狭缝函数在不同行由 0.34 变化至 0.55,变化幅度是 OMI 和 TROPOMI 的 7 倍,标准差分别是 OMI 和 TROPOMI 的 8 倍和 6 倍。EMI VIS1 波段的狭缝函数随行的变化也同样剧烈,在不同行由 0.31 变化至 0.55,变化幅度分别是 OMI 和 TROPOMI 的 8 倍和 12 倍。

导致 EMI 狭缝函数剧烈变化的原因,首先可能是光栅设计不完善导致的,其次可能是发射过程中剧烈的振动和温度变化引起的<sup>[17]</sup>。EMI 狭缝函数随行变化剧烈,在反演时使用固定的狭缝函数将引入大的不确定性;不同行采用不同的狭缝函数能够使 RMS 平均降低 19.8%,提高光谱定标精度。

### 2.2 光谱定标精度

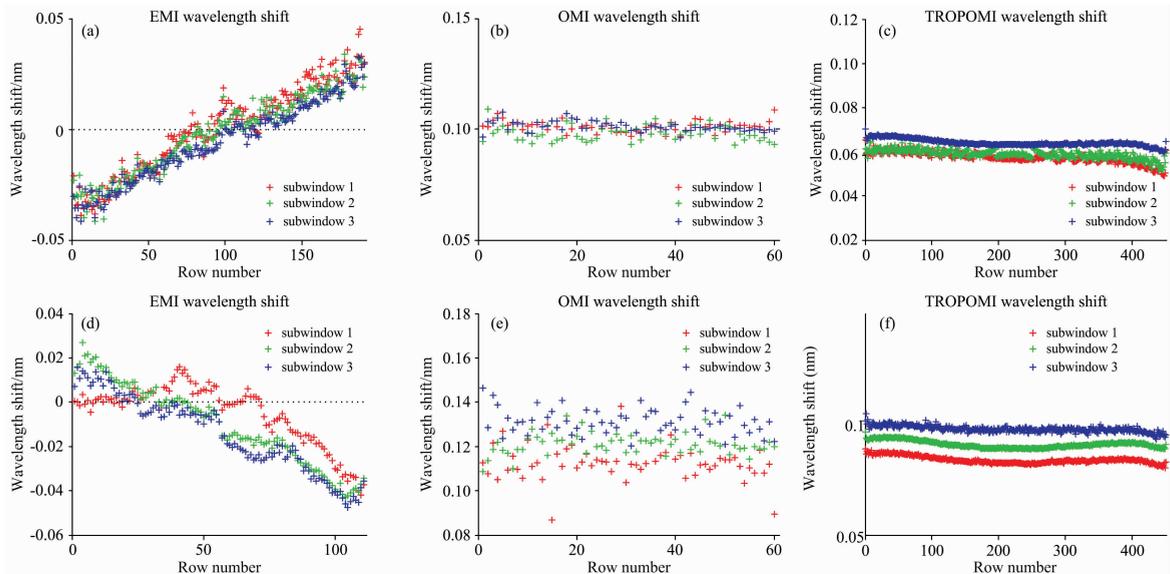


图 3 2018 年 6 月 12 日 EMI, OMI 和 TROPOMI 辐照度数据在紫外和可见光波段内的 3 个子间隔的波长漂移在跨轨道方向的变化

Fig. 3 Irradiance wavelength shift of different sub-windows in the spectral range of 312~356 nm as a function of row

图 4 展示了 2018 年 8 月 4 日 EMI 在 UV2 和 VIS1 波段连续 12 轨辐亮度数据的波长漂移。从图 4 可以看出,存在明显的行依赖性。此外,UV2 波段最后一行(191)的波长漂移最大,明显超出了 0.05nm 的设计指标。EMI 辐亮度数据的

波长漂移基本符合设计指标的要求,尽管后者的均值和标准差比前者要高一些。但是目前的波长漂移量远大于痕量气体反演的要求(0.002 nm<sup>[10]</sup>),因此在进行痕量气体反演之前,还需要对辐亮度数据进行光谱精校正。

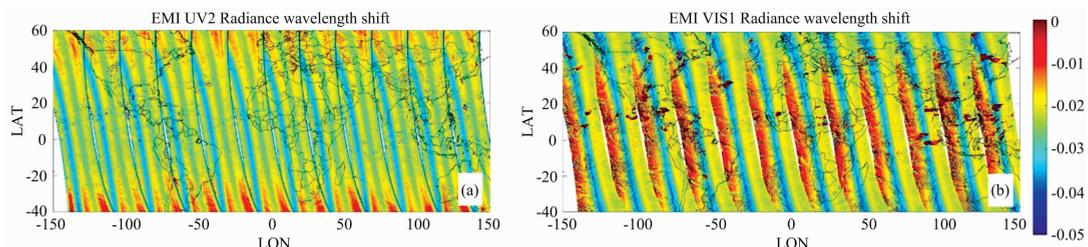


图 4 2018 年 8 月 4 日 EMI UV2 和 VIS1 波段连续 12 轨辐亮度数据的波长漂移

Fig. 4 Radiance wavelength shift of 12 consecutive orbits measured by UV2 and VIS1 band on 4 August, 2018

### 2.3 辐射定标精度

图 5 展示了三个载荷星下点观测的辐照度光谱。可以看出, EMI 与 OMI 和 TROPOMI 的变化趋势高度一致。EMI 实测辐照度与参考太阳光谱之间的相关系数分别大于 0.98 和 0.95。此外, 实测辐照度与参考太阳光谱的平均绝对差异在 UV2 和 VIS1 波段分别为 4.3% 和 3.67%, 均在设计规范范围内。较高的相关性和较小的绝对差异说明 EMI 测量的

辐照光谱可以很好地捕捉太阳光谱的细节。

图 6 展示了三个载荷在太平洋区域无云观测的辐亮度均值, 三者辐亮度处于同一数量级。在 UV2 和 VIS1 波段 EMI 与其他载荷的相关系数分别大于 0.98 和 0.92, EMI 实测辐亮度的光谱能够准确地捕捉光谱的峰谷变化特征。EMI UV2 波段与 OMI (TROPOMI) 的平均相对差异为 6.68% (13.17%), VIS1 波段的平均相对差异为 8.83% (3.31%)。

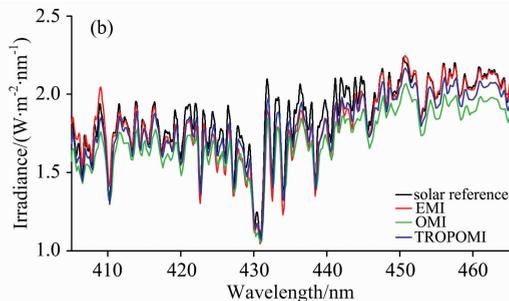
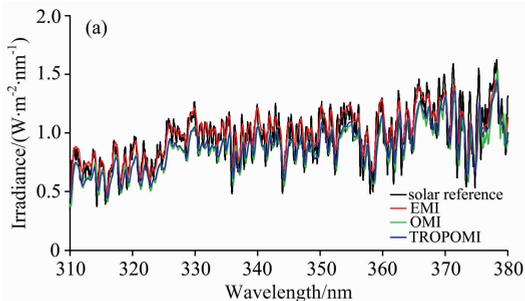


图 5 2018 年 6 月 12 日 EMI, OMI 和 TROPOMI 辐照度数据

Fig. 5 The irradiance spectra measured by EMI, OMI and TROPOMI on 12 July, 2018. The black line is a reference solar irradiance from and convolved with the EMI FWHM

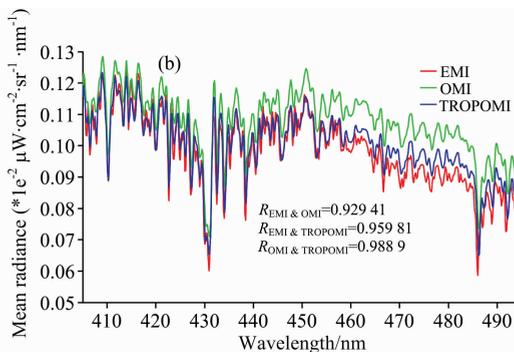
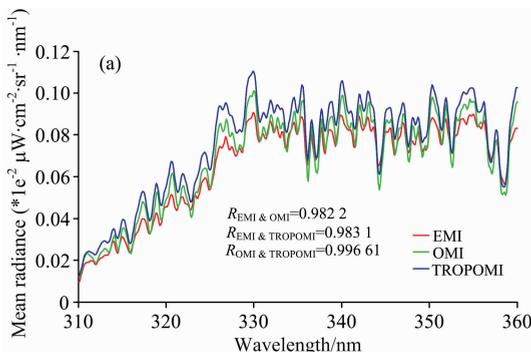


图 6 2018 年 8 月 4 日星下点像元在太平洋区域无云观测的辐亮度均值

Fig. 6 Mean radiance of nadir pixel in the clean Pacific region measured on 4 August, 2018

### 2.4 行依赖性

图 7 为三个载荷辐照度相对于星下点位置的比值分布图, 可以看出三者辐照度的行依赖性较小。定量分析表明, 紫外波段, EMI, OMI 和 TROPOMI 不同波长处的比值随行

的平均变化分别为 11.5%, 13.7% 和 13.24%。它们在可见光波段的行依赖性要比紫外波段更小, 分别为 4%, 9% 和 5.2%。

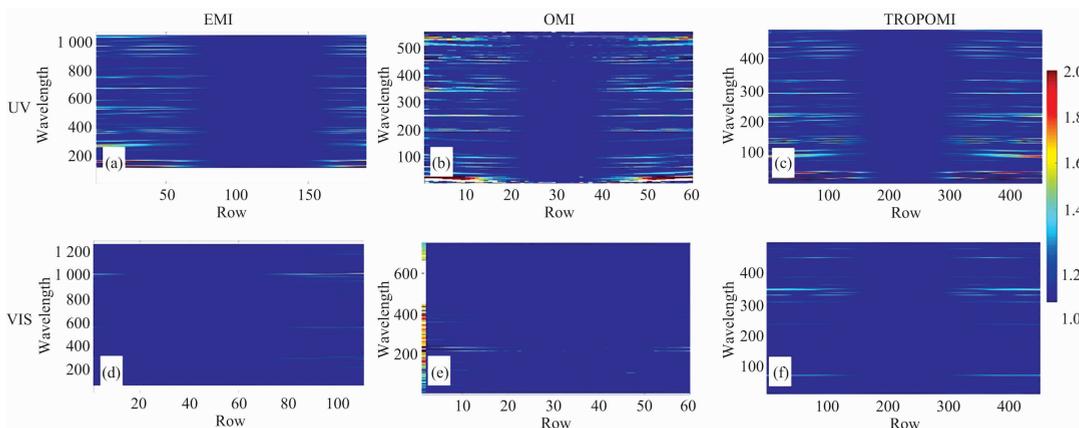


图 7 2018 年 6 月 12 日的观测辐照度相对于星下点位置的观测角依赖性

Fig. 7 Irradiance row dependence relative to nadir measured on 12 July, 2018

观测辐亮度和模拟辐亮度在不同观测角下的差异在图 8 (a)和(c)中展示,模拟结果高于观测结果,这是因为实际观测中不可避免受其他因素的影响(比如:痕量气体吸收)。将每行观测光谱与模拟光谱取比值(M/S)再归一到星下点,可

以得到辐亮度的行依赖性[图 8(b)和(d)]。在 340 nm 处, M/S 在不同观测角下的变化范围是 0.51~2.56, 行依赖性不超过 16%。在 437.5 nm 处, M/S 在不同观测角下的变化范围是 0.56~1.24, 行依赖性不超过 9%。

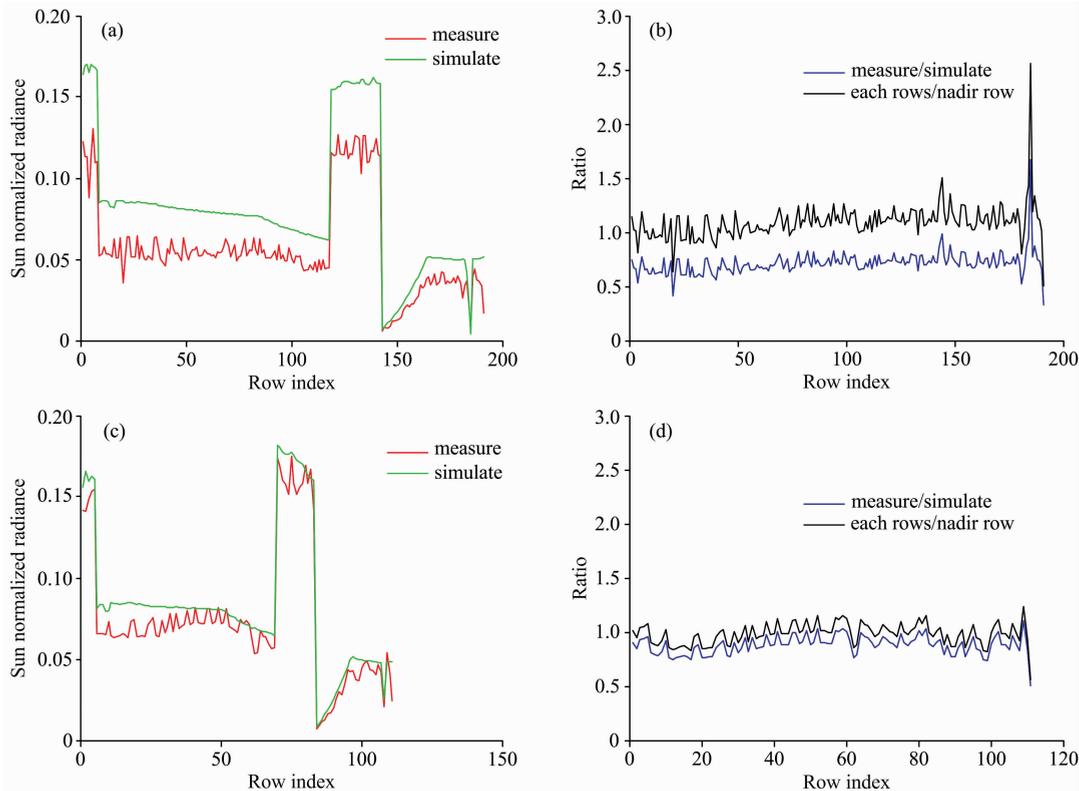


图 8 EMI 在 340 nm 和 437.5 nm 处对 greenland 岛观测的归一化辐亮度随观测角的变化

Fig. 8 (a), (c) The normalized measured radiance and the corresponding simulated radiance as a function of row; (b), (d) The ratio of the measured radiance and the simulated radiance and the radiance row dependency

### 3 结 论

对 EMI UV2 和 VIS1 波段的辐照度和辐亮度数据进行了综合评估。研究发现:(1)EMI 狭缝函数随行剧烈变化,其变化标准差(UV2=0.047, VIS1=0.054)是 OMI 和 TROPOMI 的 6 倍以上,这意味着在进行痕量气体反演的时候需要对不同行采用不同的狭缝函数。(2)EMI 辐照度数据的波长漂移同样表现出明显的观测角依赖性,但是平均漂移量很小( $<0.015$  nm),严格符合设计指标的要求。除了个别的行(UV2 的 191 行)之外,EMI 辐亮度的波长漂移均值小于 0.03 nm,光谱定标精度也符合设计指标的要求。(3)EMI 辐照度光谱与 OMI 和 TROPOMI 具有极好的相关性(相关系

数 $>0.95$ ),且与参考太阳光谱之间的绝对差异较小(UV2 波段平均 4.3%, VIS1 波段平均 3.67%),说明 EMI 辐照度数据的辐射定标精度较高。尽管辐亮度数据受多种因素的影响,洁净太平洋区域的平均辐亮度光谱的比较结果表明,EMI 与 OMI 和 TROPOMI 具有较高的一致性(相关系数 $>0.93$ )。在未来,我国计划将与 EMI 类似的国产载荷搭载在 GF-5(02)卫星和大气环境监测卫星(Atmospheric Environmental Monitoring Satellite, AEMS)上,继续服务于污染气体监测<sup>[18]</sup>。因此,本研究可以为 EMI 系列的后续载荷的设计和评估提供参考,同时还可以为利用 EMI 数据从事痕量气体反演的科研人员提供参考。

致谢:感谢生态环境部卫星环境应用中心提供的 EMI 1 级数据, NASA GESDISC 提供的 OMI 和 TROPOMI 产品。

### References

- [1] Zhang C X, Liu C, Wang Y, et al. IEEE T Geosci Remote, 2018, 56(6): 3323.
- [2] Zhao M J, Si F Q, Zhou H J, et al. Atmos. Meas. Tech., 2018, 11(9): 5403.
- [3] Munro R, Lang R, Klaes D, et al. Atmos. Meas. Tech., 2016, 9(3): 1279.
- [4] Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, et al. IEEE T Geosci Remote, 2006, 44(5): 1093.

- [ 5 ] Veefkind J P, Aben I, McMullan K, et al. *Remote Sens Environ.*, 2012, 120: 70.
- [ 6 ] Zara M, Boersma K F, de Smedt I, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, 11(7): 4033.
- [ 7 ] Dobber M, Kleipool Q, Dirksen R, et al. *J. Geophys. Res-Atmos.*, 2008, 113(D15): D15S06.
- [ 8 ] Schenkeveld V M E, Jaross G, Marchenko S, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2017, 10(5): 1957.
- [ 9 ] Boersma K F, Eskes H J, Dirksen R J, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, 4(9): 1905.
- [10] Marchenko S, Krotkov N A, Lamsal L N, et al. *J. Geophys. Res-Atmos.*, 2015, 120(11): 5670.
- [11] Voors R, Dobber M, Dirksen R, et al. *Appl. Optics*, 2006, 45(15): 3652.
- [12] Theys N, de Smedt I, Yu H, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2017, 10(1): 119.
- [13] de Smedt I, Theys N, Yu H, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, 11(4): 2395.
- [14] Boersma K F, Eskes H J, Richter A, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, 11(12): 6651.
- [15] Griffin D, Zhao X, McLinden C A, et al. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, 46(2): 1049.
- [16] Chance K, Kurucz R L. *J. Quant. Spectrosc. Ra. Trans.*, 2010, 111(9): 1289.
- [17] Cheng L X, Tao J H, Valks P, et al. *Remote Sens-Basel*, 2019, 11(24): 3017.
- [18] Zhang X Y, Wang F, Wang W H, et al. *Atmos. Res.*, 2020, 245: 105056.

## Evaluations of Environmental Trace Gases Monitoring Instrument (EMI) Level 1 Data

CHENG Liang-xiao<sup>1,2</sup>, TAO Jin-hua<sup>1\*</sup>, ZHOU Hai-jin<sup>3</sup>, YU Chao<sup>1</sup>, FAN Meng<sup>1</sup>, WANG Ya-peng<sup>1</sup>, WANG Zhi-bao<sup>5</sup>, CHEN Liang-fu<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100101, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
4. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
5. School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

**Abstract** The Environmental trace gases Monitoring Instrument (EMI) is the first high spectral resolution imaging spectrometer in China designed to monitor trace gas in tropospheric and stratospheric. To fully understand the instrument's characteristics and make better use of the level 1 (L1) data, comprehensive evaluations of irradiance and radiance data measured by the EMI instrument were carried out in this study. For both ultraviolet-2 and visible-1 bands, the slit function change drastically as a function of detectors in the across-track direction of charge-coupled device (CCD), which is more than 6 times larger than that of TROP(OMI). The use of different slit functions according to the row can improve the calibration accuracy. Small wavelength shifts were found in both irradiance and radiance data with an average value of 0.015 and 0.03 nm, respectively. Although they meet the requirement of the design specification (0.05 nm), wavelength calibration is still needed during the trace gas retrieval. EMI irradiance data agree highly ( $r > 0.95$ ) with OMI and TROPOMI and the reference solar spectrum. EMI radiance data also shows a better agreement ( $r > 0.93$ ) with OMI and TROPOMI by averaging the cloud-free pixels over the clean Pacific region. This study demonstrates the good quality of current EMI L1 data for trace gas retrieval, and it provides a reference for the design and data quality evaluation scheme of subsequent instruments.

**Keywords** GF-5; EMI; Wavelength calibration; Slit function; Data quality

(Received Nov. 17, 2020; accepted Feb. 21, 2021)

\* Corresponding author