

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.007

# 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪 0~1 级 数据处理研究

赵敏杰, 司福祺\*, 周海金, 汪世美, 江宇

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪 (Environmental trace gases monitoring instrument, EMI) 于 2018 年 5 月 9 日成功发射升空, 目前在轨运行状态良好, 能够有效获取全球紫外 - 可见波段地球大气散射光信号 (Digital number, DN) 值 (0 级数据)。为对遥感数据定量化应用, EMI 输出的 DN 值需要完成光谱定标、几何定位、辐亮度定标等处理, 得到 1 级数据产品, 1 级数据用于反演获取全球大气 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 等 2 级产品, 进而应用于定量监测全球空气质量变化以及污染气体的分布输运过程。

**关键词:** 星载成像光谱仪; 遥感数据定量分析; 全球痕量大气监测

中图分类号: O433; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)01-0066-08

## Level 0~1 Processor of Spaceborne Environmental Trace Gases Monitoring Instrument

ZHAO Minjie, SI Fuqi\*, ZHOU Haijin, WANG Shimei, JIANG Yu

(Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Environmental trace gases monitoring instrument (EMI) was launched on May 9th, 2018, which can effectively acquire global ultraviolet-visible signal of atmosphere scattering. EMI raw digital number(DN) is called level 0 data. For quantitative application of EMI sensing data, spectral calibration, geometric positioning and radiometric calibration are required. Then the level 1 data is obtained. The level 1 data is used as input for scientific atmospheric retrieval algorithms. Retrieval results are applied to quantitatively monitor the global air quality changes and the transmission of pollutant gases distribution, which could get spatial and temporal distribution and variation of key global atmospheric composition and pollutants (such as NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, etc.).

**Key words:** spaceborne imaging spectrometer; remote sensing data quantitative application; global trace gas monitoring

**基金项目:** Supported by Foundation of Hefei Institutes of Physical Science of Chinese Academy of Sciences (中国科学院合肥物质科学研究院院长基金, YZJJ201605), National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41705016)

**作者简介:** 赵敏杰 (1987 - ), 河南商丘人, 博士, 助理研究员, 主要从事遥感数据处理方面的研究。

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

**收稿日期:** 2018-09-29; **修改日期:** 2018-11-05

\* **通信联系人.** **E-mail:** sifuqi@aiofm.ac.cn

## 1 引言

大气痕量气体差分吸收光谱仪 (EMI) 搭载在高分 5 号卫星上, 于 2018-05-09 成功发射。经过加热去污等操作后, 于 2018-05-28 正式开机并获取有效的大气遥感数据。EMI 是一种推扫式成像光谱仪<sup>[1-2]</sup>, 运行在太阳同步轨道进行天地观测、面阵推扫, 地面观测范围穿轨方向 2600 km, 能够实现一日全球覆盖从而监测全球关键大气成份的分布。EMI 光谱范围为 240~710 nm, 视场  $114^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , 光谱分辨率为 0.3~0.5 nm。光谱通道设计为四个通道, UV1: 240~315 nm; UV2: 311~403 nm; VIS1: 401~550 nm; VIS2: 545~710 nm。EMI 在轨运行时通过探测地球大气或地表反射、散射的紫外 / 可见光, 利用差分吸收光谱技术来反演大气中痕量气体的分布和变化, 能够同时记录被测对象的光谱信息和空间信息, 得到监测目标的成像数据立方。为对成像数据进行量化的应用, 需要对遥感数据进行不同等级的数据处理<sup>[3-4]</sup>。从卫星下传的 EMI 原始数据称为 0 级数据, 0 级数据是 EMI 探测器输出的原始 DN 值, 需要对 DN 值进行光谱定标、辐射定标、几何定位等得到 1 级标准产品, 1 级标准产品为定标后的高光谱数据, 利用反演算法对高光谱数据处理得到  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等 2 级产品, 2 级产品应用于全球或局部大气污染的研究。

## 2 1 级数据处理

EMI 载荷 1 级数据处理包括暗背景扣除、增益修正、光谱校正、辐射校正和几何校正等, 产品数据格式为 HDF5。1 级数据处理功能模块如图 1 所示。

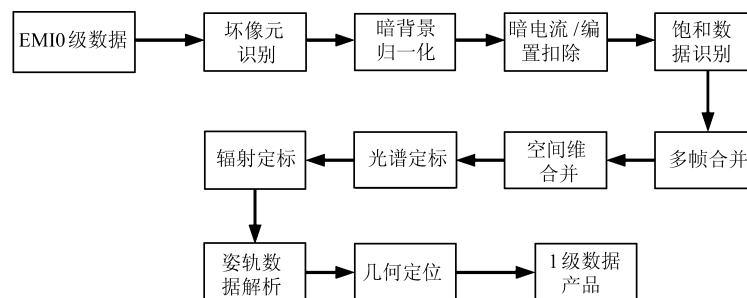


图 1 EMI 遥感数据 1 级数据处理流程图

Fig.1 EMI L1 data processing flow chart

**坏像元识别:** 坏像元产生原因为宇宙高能粒子等对探测器的损伤<sup>[5-6]</sup>, 损伤探测像元的响应值出现异常。对遥感数据进行分析, 如果观测光谱中出现明显奇异值, 可认定为由探测器坏像元造成, 并定位其行列号, 获取坏像元的分布情况, 记录到坏像元位置工程文件。

**暗背景:** EMI 在轨运行时, 每轨的阴影区域会进行暗背景的测量, 暗背景归一化功能用于对多幅暗背景观测数据进行处理, 处理结果用于后续科学数据的暗电流扣除。

**饱和数据识别:** 根据工作参数如积分时间、增益等设置饱和阈值, 对获取的每幅光谱数据进行分析, 识别饱和数据并进行标识。

**多帧合并、空间维合并:** 可以获取不同空间分辨率遥感数据。

**光谱定标模块:** 太阳光定标光谱数据扣除偏置暗电流后, 记录 CCD 照亮区域的光谱数据  $S_i$  (下标  $i$  代表行号, 即空间维编号)。对每条光谱, 通过寻峰处理, 将特征 Fraunhofer 谱线峰位像元编号和对应波长进行配对。最后采用最小二乘法对谱线波长和峰位数据组进行多项式回归分析, 得到仪器的光谱定标方程,

进而计算各个像元中心对应的波长值。

因为光谱在 CCD 探测器上近似成线性排列, 建立光谱定标方程模型

$$Y_{ij} = \sum_{n=0} C_{in} X_{ij}^n, \quad (1)$$

式中多项式阶数取 2 阶,  $C_{in}$  为波长标定的多项式系数,  $n$  为多项式阶数,  $X_{ij}$  为第  $i$  行  $j$  列的像元号,  $Y_{ij}$  为对应的光谱波长。采用最小二乘法对数据组  $[X_{ij}, Y_{ij}]$  进行回归分析求解光谱定标方程中的  $C_{in}$ 。

辐亮度定标功能: 采用查表法获取辐射定标系数, 即遥感数据的工作参数如积分时间、增益、CCD 读出模式等作为查表参数, 根据参数定位辐射定标系数。读取辐射定标工程文件, 输入载荷的辐射定标矩阵, 将数字信号 DN 值数据转化为辐亮度数据。处理过程中, 要求能够根据工作参数查找地面辐射定标系数, 完成辐射定标。辐射定标模型为

$$R_{ij} = D_{Nij} a_{ij} \eta_{ij}, \quad (2)$$

式中  $R_{ij}$  为第  $i$  行  $j$  列的探测像元对应的辐亮度值,  $D_{Nij}$  为 EMI 无量纲的响应值,  $a_{ij}$  为地面实验室获取的辐射定标系数,  $\eta_{ij}$  为 EMI 地面 - 在轨响应差异系数, 响应差异系数可以通过对比 EMI 内置卤钨灯 (6 V, 10 W) 地面、在轨响应而获取到, 如图 2 所示。

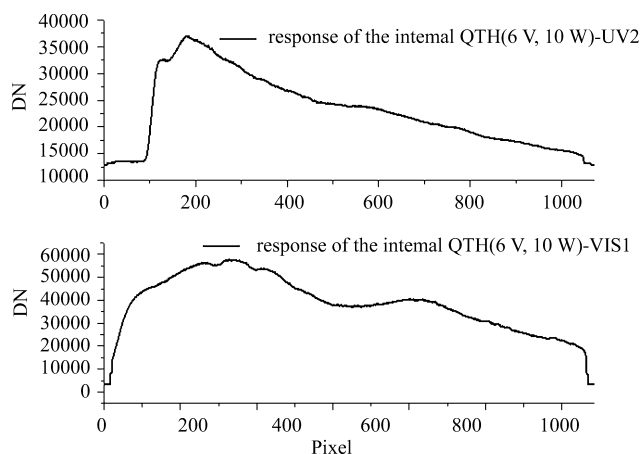


图 2 EMI 内置卤钨灯响应 DN 值

Fig.2 EMI response to quartz tungsten halogen

姿轨数据解析的具体功能: 是对预处理和反演所必须的辅助参数完整性做校验, 包括曝光时刻、GPS 数据、姿态数据等。根据星地接口对辅助数据文件进行分析, 提取产品生产模块的载荷、轨道和姿态等卫星参数, 输出到载荷姿轨参数文件, 并对少量的误码错误采用填充的方式修补。

几何定位: 利用载荷提供的几何定标方程矩阵, 结合卫星飞行轨道、姿态、载荷安装坐标等参数, 利用成像共线方程, 确定载荷空间维不同位置对应的地面像元中心经纬度。并且基于成像时间、地面经纬度、卫星位置, 计算出地面光照情况, 包括太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角、日地距离等信息。

### 3 1 级数据处理结果

#### 3.1 光谱定标结果

EMI 在轨通过漫反射板观测太阳光, 获取太阳光谱用以光谱定标, 由于 UV1 通道太阳光谱信号较弱, 光谱定标采取地面定标。EMI 通过漫反射板在轨获取的 UV2、VIS1、VIS2 太阳光谱图像如图 3 所示。

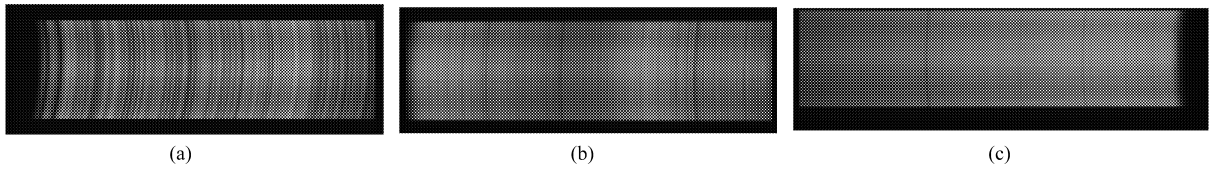


图 3 EMI 在轨获取的太阳光谱图像。(a)UV2 通道; (b)VIS1 通道; (c)VIS2 通道

Fig.3 In-orbit solar spectral images obtained by EMI. (a) UV2 channel; (b) VIS1 channel; (c) VIS2 channel

光谱定标时, UV2、VIS1、VIS2 通道选取的吸收峰如表 1 所示。

表 1 在轨光谱定标谱线

Table 1 Spectral lines for on-orbit spectral calibration

通道	定标谱线 (nm)
UV2	336.25, 352.50, 393.50
VIS1	410.25, 486.28, 532.90
VIS2	571.16, 589.28, 656.51

根据选取的特征峰进行多项式拟合, 获得光谱定标方程, 进而得到每个探测像元的中心波长, EMI 中心视场光谱定标后的太阳光谱图如图 4 所示。

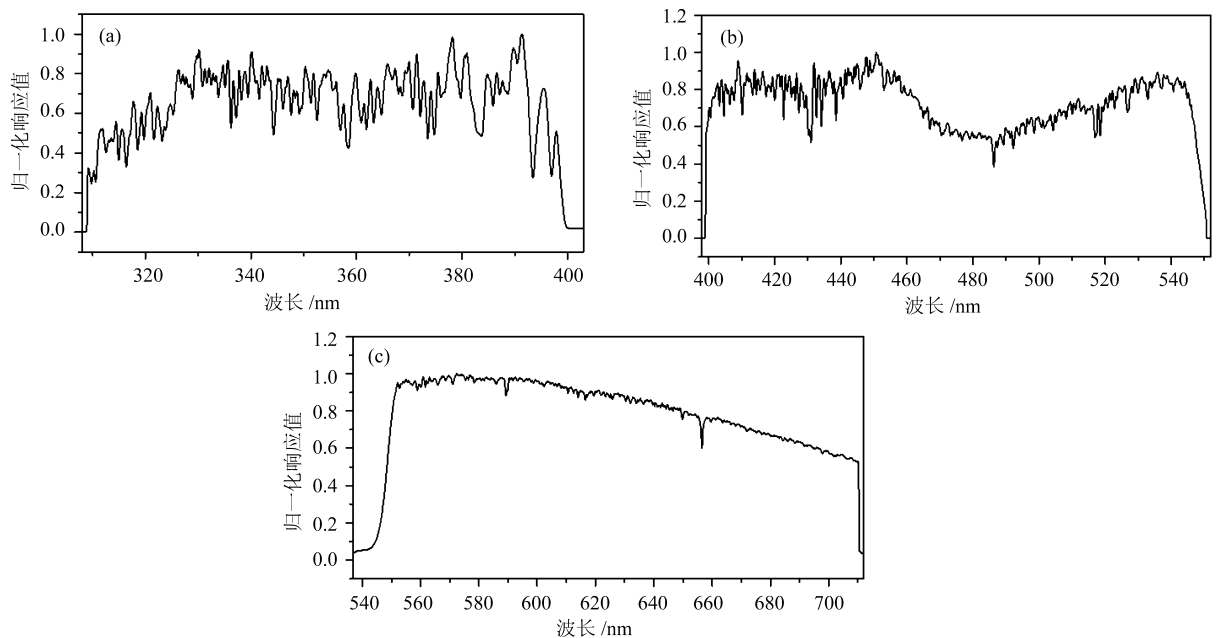


图 4 EMI 中心视场太阳光谱。(a) UV2 通道中心视场太阳光谱; (b) VIS1 通道中心视场太阳光谱; (c) VIS2 通道中心视场太阳光谱

Fig.4 Solar spectrum in center field of view. (a) UV2 solar spectrum in center field of view; (b) VIS1 solar spectrum in center field of view; (c) VIS2 solar spectrum in center field of view

将定标后的特征峰和选取的特征峰波长进行比较, 结果表明光谱定标精度优于 0.05 nm。

### 3.2 辐亮度定标结果

EMI 轨道周期为 98 min, 一天获取 15 轨数据, 能够覆盖全球观测, 获取的 540 nm 全球辐亮度如图 5 所示。

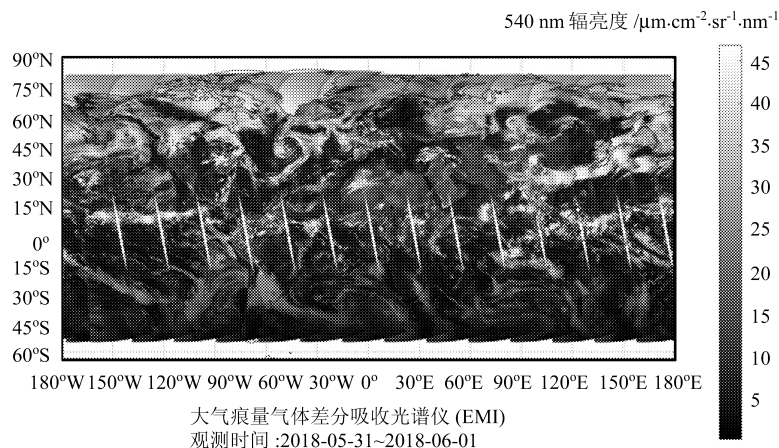


图 5 540 nm 全球辐亮度

Fig.5 Global radiance image of 540 nm

通过与 TROPOMI<sup>[7-8]</sup> 载荷相同日期和相近过境地区进行交叉对比, 统计分析可得到 EMI 的辐射定标精度。为保证交叉比对精度, 对比区域选取晴空海洋、晴空沙漠等, 选取的数据应保证太阳光照角度、观测角度的一致性。

表 2 TROPOMI 与 EMI 参数对比

Table 2 Technical parameters of TROPOMI and EMI

技术参数	TROPOMI	EMI
飞行高度	820 km(太阳同步)	705 km(太阳同步)
观测模式	二维 CCD- 推扫型	二维 CCD- 推扫型
观测刈幅	2600 km	2600 km
升交点时间	13:30	13:30
轨道周期	T=98.8 min	T=98.925 min
	14~15 圈 / 天	14~15 圈 / 天
光谱范围	BD1: 267~299 nm	UV1: 240~315nm
	BD2: 299~331 nm	UV2: 311~403 nm
	BD3: 304~400 nm	VIS1: 401~550 nm
	BD4: 400~498 nm	VIS2: 545~710 nm
	BD5 :661~724 nm	
总视场	114°(交轨)	114°(交轨)
光谱分辨率	0.5 nm	0.3~0.5 nm
空间分辨率	7 km×7 km	48 km×13 km

选取同一天晴空太平洋、撒哈拉沙漠区域的 TROPOMI 和 EMI 相近轨道进行比对, 结果见图 6。

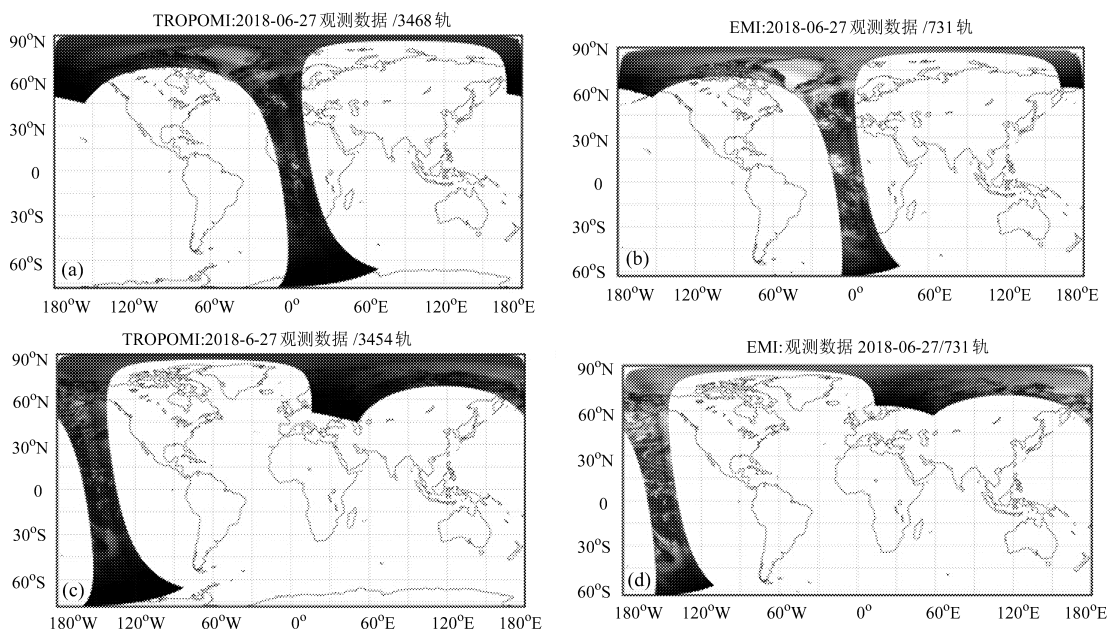


图 6 交叉对比轨道图。(a) TROPOMI 撒哈拉沙漠区域轨道; (b) EMI 撒哈拉沙漠区域轨道; (c) TROPOMI 太平洋区域轨道; (d) EMI 太平洋区域轨道

Fig.6 Orbits for cross-contrast. (a) TROPOMI orbit pass through Sahara Desert; (b) EMI orbit pass through Sahara Desert; (c) TROPOMI orbit pass through Pacific Ocean; (d) EMI orbit pass through Pacific Ocean

EMI 轨道图中的白色区域为有云饱和区域, 交叉对比时应选取无云区域。EMI 与 TROPOMI 在撒哈拉沙漠区域、太平洋区域的在轨交叉对比结果分别如图 7、图 8 所示, 因 UV1 通道 240~299 nm 波段大气吸收较强, 信号很弱, 选取 299~310 nm 进行比较。

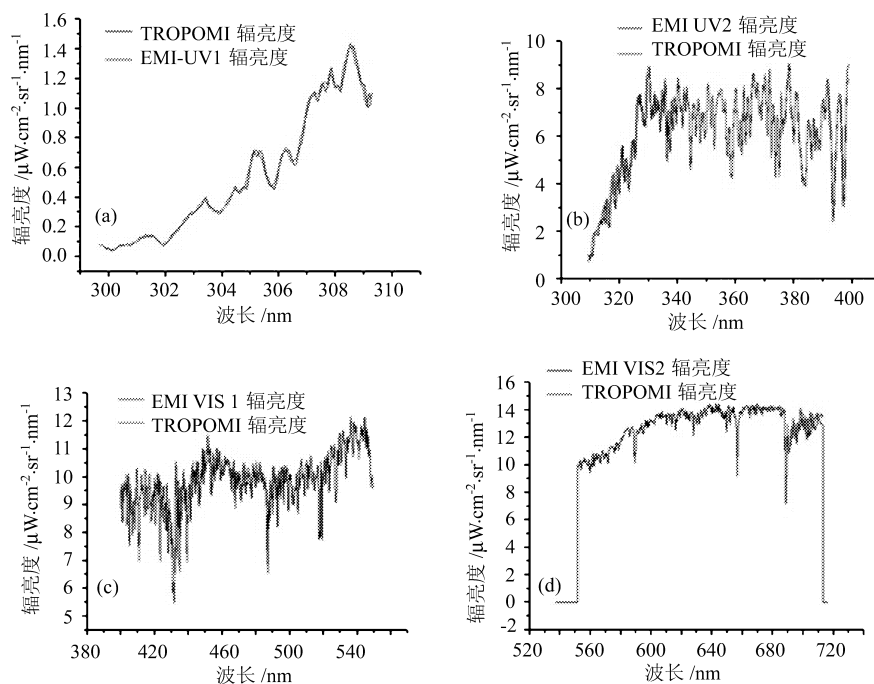


图 7 撒哈拉沙漠区域对比结果

Fig.7 Cross-contrast results of Sahara Desert

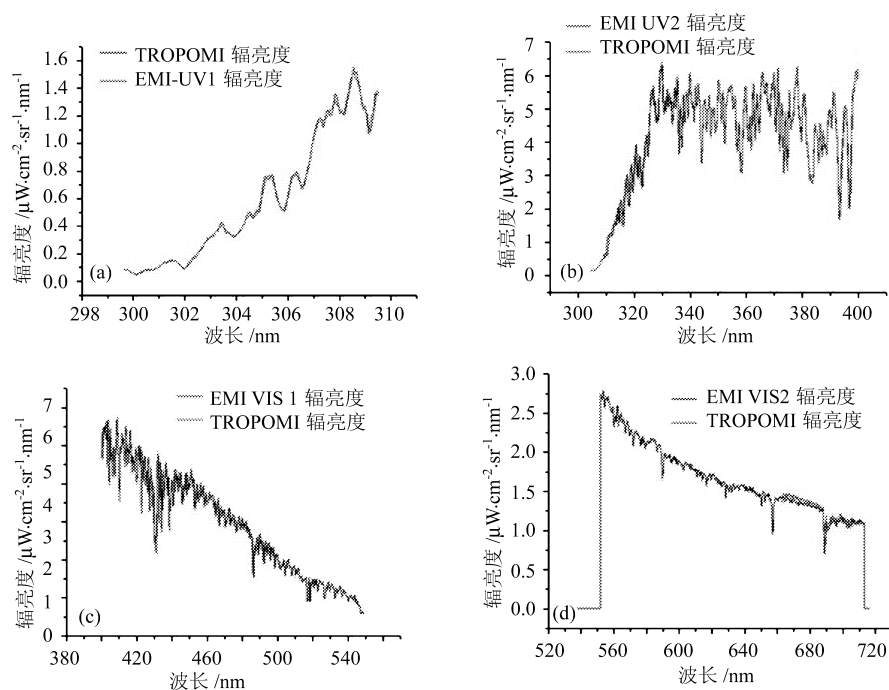


图 8 太平洋区域比对结果

Fig.8 Cross-contrast results of Pacific Ocean

表 3 EMI-TROPOMI 比对结果

Table 3 Cross-contrast results between EMI and TROPOMI

波长 (nm)	绝对辐射定标精度 (%)
340	6.2
360	6.3
380	6.0
400	5.8
420	5.3
440	5.7
460	5.1
480	6.1
500	6.0
平均值	5.8

由太平洋、撒哈拉沙漠地区的交叉比对结果可知，EMI 辐射定标的平均精度为 5.8%。

## 4 结 论

由 EMI 遥感数据 0~1 级的处理结果可知，其光谱定标精度优于 0.05 nm，满足设计的技术指标。由交叉比对结果可知，EMI 辐射定标的平均精度为 5.8%。后续随着 EMI 遥感数据的积累，需进一步和 TROPOMI 进行交叉比对，研究 EMI 长期情况下的辐射定标精度。

## 参考文献:

- [1] Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi, *et al.* Spectral calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(11): 2881-2885(in Chinese).  
周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱定标技术研究 [J], *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(11): 2881-2885.
- [2] Zhao Minjie, Si Fuqi, Jiang Yu, *et al.* In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3): 567-573(in Chinese).  
赵敏杰, 司福祺, 江宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标 [J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(3): 567-573.
- [3] Levelt P F, Noordhoek R. *OMI Instrument, Level 0-1b Processor, Calibration & Operations* [Z]. ATBD-OMI-01, Version 1.1, August 2002.
- [4] Bhartia P K. *OMI Ozone Products* [Z]. ATBD-OMI-02, Version 2.0, August 2002.
- [5] Keski-Kuha R A M, Blumensteck G M, Fleetwood C M, *et al.* Effects of space exposure on ion-beam-deposited silicon-carbide and boron-carbide coatings [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(34) : 8038-8042.
- [6] Pellicori S F, Martinez C L, Hausgen P, *et al.* Development and testing of coatings for orbital space radiation environments [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(4) : A339-A350.
- [7] Voors R, Vries J D, Bhatt I S, *et al.* TROPOMI: the Sentinel 5 precursor instrument for air quality and climate observations: status of the current design [C]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10564**: 3.
- [8] Vries J D, Laan E C, Hoogeveen R W M, *et al.* TROPOMI: Solar backscatter satellite instrument for air quality and climate [C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6744**: 674409.