

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.01.005

# 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪基于太阳的 在轨辐射定标

汪世美, 司福祺\*, 赵敏杰, 周海金, 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:** 基于整机双向散射分布函数 (Bi-directional scattering distribution function, BSDF), 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪 (Environmental trace gases monitoring instrument, EMI) 在轨可完成基于太阳的辐射定标, 整机 BSDF 表征了 EMI 观测光路和定标光路辐射特性的关系。观测光路辐射定标已在地面完成, 定标光路辐射特性定标在轨基于太阳完成, 进而得到了整机 BSDF 参数, 基于此实现了 EMI 在轨基于太阳的辐射定标。结果表明在可比光谱范围内, 与 TROPOMI (Tropospheric ozone-monitoring instrument) 载荷交叉比对结果的差异在 5%~6.5% 以内。

**关键词:** 星载成像光谱仪; 双向散射分布函数; 在轨辐射定标

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)01-0049-08

## On-Orbit Radiometric Calibration of Spaceborne Differential Optical Absorption Spectrometer Based on the Sun

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

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

**Abstract:** On-orbit radiometric calibration of spaceborne differential optical absorption spectrometer can be conducted based on the bi-directional scattering distribution function (BSDF) and the sun. The EMI BSDF is the ratio of EMI radiance and irradiance calibration function. Radiometric calibration of observation path is completed on the ground. Radiometric calibration of calibration path can be realized by the sun. Then EMI BSDF is obtained, and the on-orbit radiometric calibration is conducted. The results between the EMI and TROPOMI show that the accuracy of the radiance calibration is 5%~6.5%.

**Key words:** spaceborne imaging spectrometer; bi-directional scattering distribution function; on-orbit radiometric calibration

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41705016), 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)

**作者简介:** 汪世美 (1972 -), 安徽桐城人, 硕士, 副研究员, 主要从事环境光学检测技术方面的研究。

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

**收稿日期:** 2018-10-07; **修改日期:** 2018-11-29

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

## 1 引言

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪 (Environmental trace gases monitoring instrument, EMI) 是一种推扫式成像光谱仪, 具有高分辨率、宽光谱范围、大视场角的特点, 能够同时记录观测对象的光谱信息和空间信息<sup>[1-2]</sup>。载荷运行在太阳同步轨道, 在轨运行时通过探测地球大气或地表反射、散射的紫外 / 可见光光谱信息, 基于差分吸收光谱 (Differential optical absorption spectroscopy, DOAS) 算法、TOMS 算法等反演算法解析痕量污染气体成分分布和变化信息。EMI 在轨观测示意图如图 1 所示。

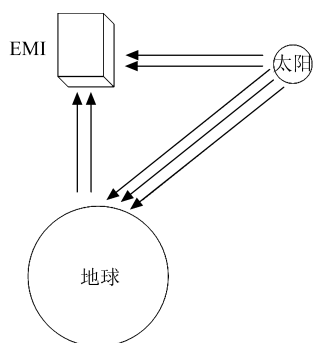


图 1 EMI 在轨观测与定标示意图

Fig.1 Diagram of EMI on-orbit observation and calibration

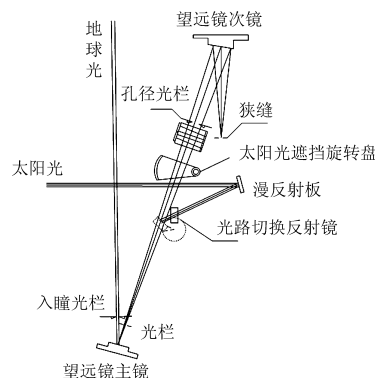


图 2 EMI 光学系统组成图

Fig.2 Diagram of EMI optical system

EMI 有两个观测窗口: 地球光观测光路 (观测光路) 和太阳光观测光路 (定标光路)。地球光观测窗口用来探测地球散射光辐亮度信息, 太阳光观测窗口获取太阳辐照度信息。因观测与定标为两个独立光路, 光路之间具有的非等效性可用整机双向散射分布函数 (Bidirectional scattering distribution function, BSDF) 来表征, 整机 BSDF 确定了定标光路和地球观测光路辐射特性的关系, 利用整机 BSDF 参数可以在轨绝对辐射定标。因实验装置欠缺, 在地面无法完成整机 BSDF 的测试, 但已完成观测光路的辐射特性定标, EMI 发射升空后, 利用太阳光可获取太阳光观测光路的辐射特性, 通过地面获取的地球光观测光路辐射特性和在轨获取的太阳光观测光路辐射特性能够得到 EMI 的整机 BSDF, 基于此和太阳辐照度实现了在轨绝对辐亮度的定标。

## 2 整机 BSDF

### 2.1 观测与定标光路

EMI 观测与定标光路如图 2 所示, EMI 对地观测时太阳光挡板位于太阳光孔处, 阻挡来自太阳的入射光, 同时光路切换反射镜处于图中实线位置, 此时地球光通过望远镜主镜进入观测光路, 进行对地常规测量。在定标模式下打开定标窗口, 太阳光照射到定标板上, 光路切换镜旋转到定标光路, 完成对太阳光谱的测量。

观测光路通过主镜、次镜将地球散射光引入中继系统、Offner 光谱仪; 定标光路经由光路切换镜将太阳光经由定标板直接转入次镜, 与观测光路耦合进入中继系统、Offner 光谱仪。由于两种光路存在非等效性, 光学系统 MTF、光学系统效率、到达光谱仪前狭缝处的能量分布存在一定差异性, 为此需要确定两光路的等效耦合系数。

### 2.2 整机 BSDF

整机 BSDF 表征定标光路与观测光路辐射相应关系, 是角度与波长的函数, 为获取整机 BSDF 参数,

要进行观测和定标光路的辐射特性定标。由于 EMI 具有线性响应, EMI 观测光路辐射特性方程为

$$L_{\text{obs}} = f_{\text{obs}} \cdot S_{\text{obs}}, \quad (1)$$

式中  $L_{\text{obs}}$  为观测光路入瞳处辐亮度, 单位为  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ ,  $f_{\text{obs}}$  为观测光路辐射特性,  $S_{\text{obs}}$  为载荷响应值。

EMI 在轨定标光路辐射特性方程为

$$L_{\text{cal}} = B_{\text{cal}} \cdot E_{\text{cal}} \cdot f_{\text{cal}} \cdot S_{\text{cal}}, \quad (2)$$

式中  $L_{\text{cal}}$  为定标光路观测入瞳处的辐亮度, 单位为  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ ;  $f_{\text{cal}}$  为定标光路辐射特性;  $S_{\text{cal}}$  为定标光路的响应值;  $B_{\text{cal}}$  为漫反射板双向反射分布函数 (Bi-directional reflectance distribution function, BRDF) 值;  $E_{\text{cal}}$  为太阳辐照度值。整机的 BSDF  $B_{\text{emi}}$  为

$$B_{\text{emi}} = \frac{f_{\text{obs}} \cdot S_{\text{obs}}}{f_{\text{cal}} \cdot S_{\text{cal}}} \cdot B_{\text{cal}}. \quad (3)$$

基于整机 BSDF 和太阳辐照度可完成在轨绝对辐亮度  $L_{\text{atm}}$  的定标, 有

$$L_{\text{atm}} = E_{\text{cal}} \cdot B_{\text{emi}}. \quad (4)$$

### 3 整机 BSDF 在轨定标过程

对于观测光路, 在地面实验室通过灯-板系统与积分球光源完成了四个通道的定标; 对于定标光路, 因缺乏测试转置未在地面完成, 但对定标光路上的关键部件定标板的 BRDF 进行了详细的测试, 载荷发射升空后基于太阳辐照度和定标板的 BRDF 可获取到定标光路辐射特性, 进而得到 EMI 整机 BSDF。

#### 3.1 定标板 BRDF 特性

定标板的研制是定标光路的关键技术, 通过复杂工艺处理, 既要适应空间环境特性要求, 又满足定标所需要的光学特性要求。研究内容具体包括: 材料表面粗糙度、光学反射率、空间散射的朗伯性特性; 空间环境的原子氧、紫外辐照、粒子辐射对材料光学特性的影响<sup>[3-5]</sup>。

针对定标板的 BRDF 测量, 考虑太阳光入射俯仰角与方位角变化、定标系统探测视场角度范围。测试方法采用相对测量法, 通过目标板和标准板的对比测量得到待测目标板的 BRDF 值, 即

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{\rho}{\pi} R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda). \quad (5)$$

对于相对测量法引入反射率因子  $R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ , 为标准板的方向-半球反射率, 式中  $\theta$  为天顶角,  $\phi$  为方位角, 下标 i 表示入射, 下标 r 表示反射方向, 图 3 为测试结果。

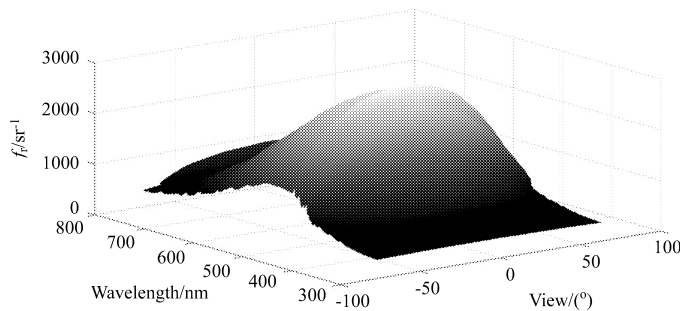


图 3 定标板实验室 BRDF 测试结果

Fig.3 Test result of diffuser plate BRDF

在轨辐射定标时, 太阳的光谱辐照度经由定标板的 BRDF 测量结果转化为定标系统的辐射亮度。

### 3.2 观测光路实验室辐亮度定标

EMI 四个光谱通道分别为紫外 1 通道 (240~315 nm)、紫外 2 通道 (311~403 nm)、可见 1 通道 (401~550 nm)、可见 2 通道 (545~710 nm)。对于紫外 1 通道, 仪器在紫外波段响应度低, 再加上一般定标光源在此波段的辐射信号较弱, 信噪比小导致定标困难。为此, 辐射定标时考虑将紫外通道 1 与其余通道分开进行, 采用不同的定标方案:

1) 紫外 1 通道采用灯 - 板系统, 定标灯采用 1000 W 紫外增强型氙灯, 通过提高定标光源的功率实现该波段的紫外辐射定标。

2) 紫外 2 通道、可见 1 通道、可见 2 通道三个通道采用 Labsphere 积分球系统进行辐射定标。

大气痕量气体差分吸收光谱仪辐射定标方案如图 4 所示。

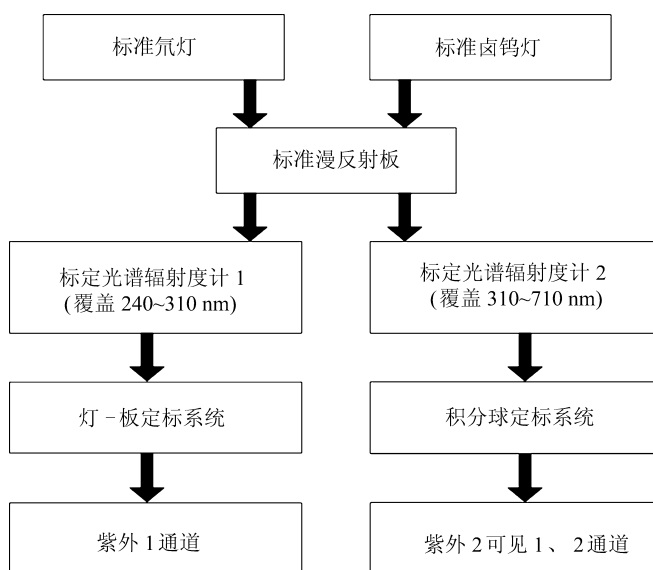


图 4 主光路地面实验室定标方案

Fig.4 Calibration of observation optical path on ground

表 1 所示为观测主光路绝对辐亮度系数定标结果。

表 1 辐亮度定标与标准辐亮度比较

Table 1 EMI radiance calibration results and standard radiance

波长 (nm)	标准辐亮度 [ $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ ]	标定辐亮度 [ $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ ]	定标辐亮度 标准辐亮度
540	6.745	6.747	1.0003
520	5.500	5.480	0.9963
500	4.589	4.590	1.0002
480	3.588	3.591	1.0008
460	2.766	2.738	0.9898
440	2.058	2.052	0.9970
420	1.375	1.394	1.0138

### 3.3 在轨辐照度定标

GF-5 卫星于 2018 年 5 月 9 日在太原卫星发射中心由长征四号丙运载火箭发射升空, 并成功进入预定轨道。卫星入轨后, 按飞行程序进行太阳电池阵展开, 数传天线展开, 大气痕量气体差分吸收光谱仪载荷进行了加热去污工况设置以及载荷开机对地观测等工作。图 5 为 EMI 获取的太阳光谱图像, 图像强度适中, 太阳谱线结构清晰。

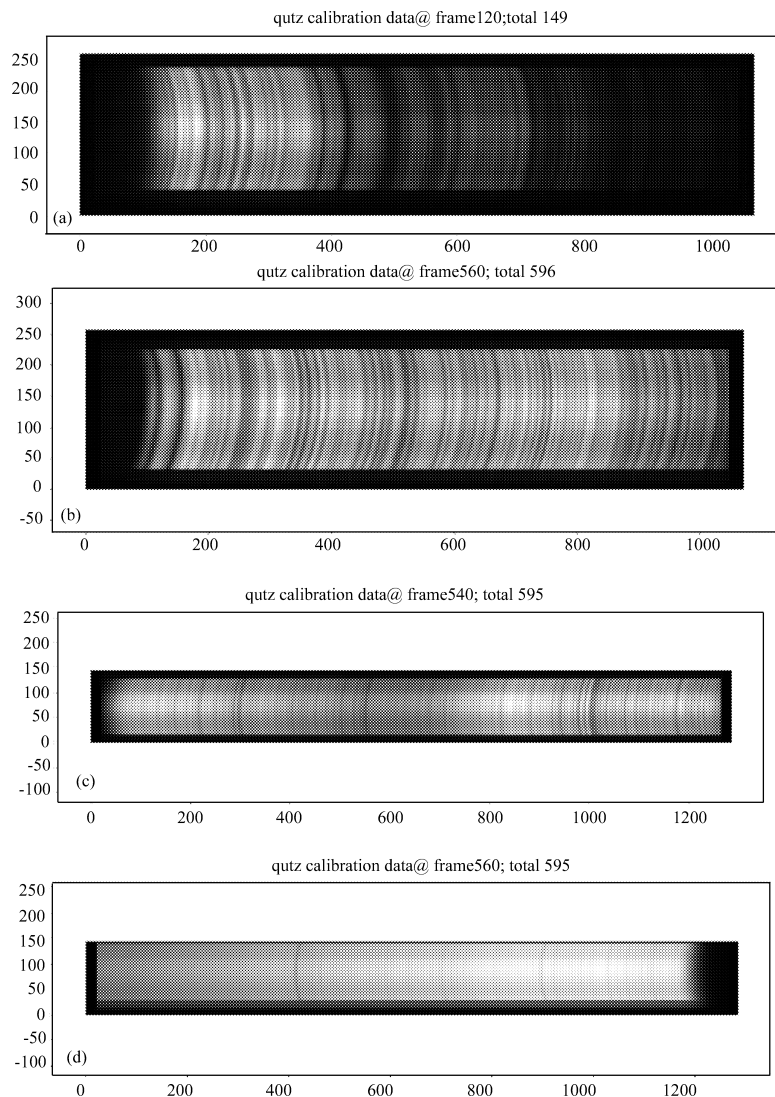


图 5 太阳光辐射定标

Fig.5 Solar calibration results

根据漫反射定标板的 BRDF 测试数据, 太阳辐照度经铝漫反射板转换为辐射亮度, 如图 6 所示。

通过定标光路与主光路比较, 基于主光路辐射亮度定标系数得到的辐射亮度与基于漫反射板得到的辐射亮度存在特定的差值, 这是两种光路存在非等效性造成。两种方式计算的漫反射板处的辐射亮度结果比较如图 7 所示。

根据整机 BSDF 算法, 利用地面实验室测定的观测主光路的辐射亮度定标系数、在轨太阳辐照度定标测试, 得到整机 BSDF 参数。利用整机 BSDF 系数得到在轨太阳定标系数, 通过系数修正, 得到在轨利用太阳定标得到的辐射亮度值如图 8 所示。

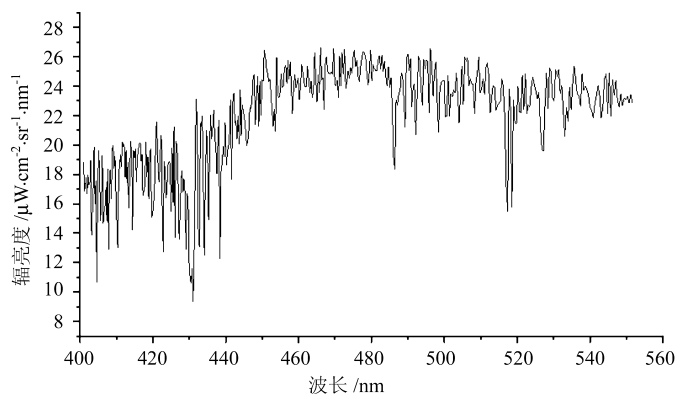


图 6 定标光路得到的辐亮度

Fig.6 Radiance of calibration path

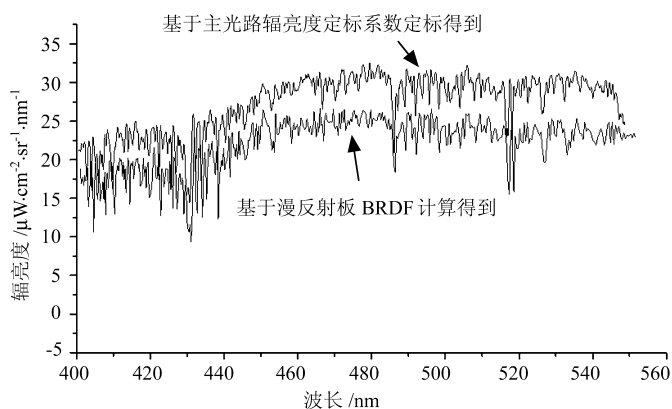


图 7 两种方式计算辐亮度结果比较

Fig.7 Comparison of radiance results obtained by two methods

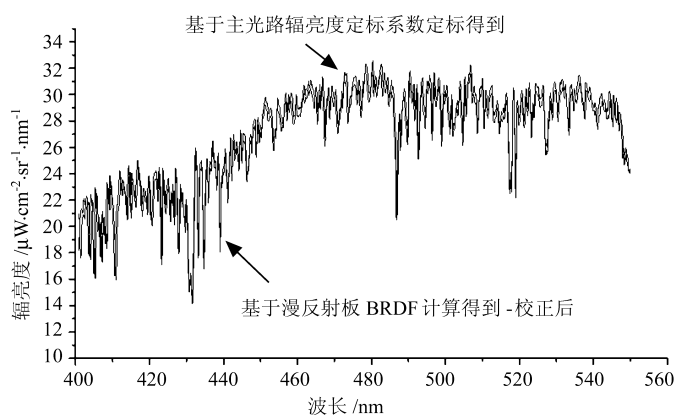


图 8 利用 BSDF 参数计算太阳定标辐亮度与地面辐亮度定标结果比较

Fig.8 Comparison of radiance results obtained by BSDF-solar and by ground calibration

#### 4 基于太阳光辐照度的在轨辐亮度定标结果

EMI 载荷在轨运行一段时间后, 利用太阳辐射定标方法, 根据在轨定的 BSDF 参数, 对载荷对地观测

数据进行了辐亮度定标, 并将辐亮度定标结果和 TROPOMI<sup>[6-7]</sup> 进行比较。比较时, EMI 与 TROPOMI 载荷选取相同日期和相近过境地方时, 两载荷获取同一目标探测数据, 验证辐射定标结果。

考虑到 TROPOMI 载荷瞬时视场及光谱响应存在差异, 交叉辐射对比方法如下:

- 1) 交叉对比区域选择: 选取晴空海洋、晴空沙漠等均一观测目标的过境观测数据, TROPOMI 载荷与 EMI 载荷的过顶太阳时相邻, 尽可能保证太阳光照角度、观测角度一致;
- 2) TROPOMI 载荷观测数据空间维降采样, 空间分辨率保持一致;
- 3) 基于 TROPOMI 载荷的光谱采样间隔、光谱响应等参数, 对 EMI 载荷观测光谱数据光谱维进行重采样。

分别选取了太平洋区域、撒哈拉沙漠进行 EMI 和 TROPOMI 辐射定标, 每个区域分别选取了两点进行 比较, 比较结果如图 9、10 所示。

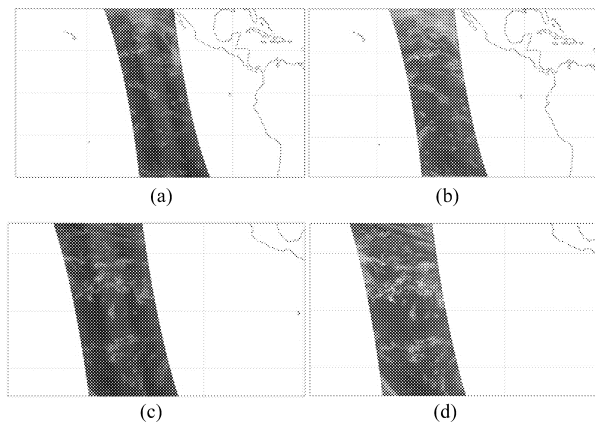


图 9 TROPOMI 与 EMI 太平洋区域辐亮度定标结果比较。(a)TROPOMI - 太平洋 1; (b) EMI - 太平洋 1; (c)TROPOMI - 太平洋 2; (d)EMI - 太平洋 2

Fig.9 Pacific Ocean radiance between EMI and TROPOMI. (a)TROPOMI- Pacific Ocean 1; (b)EMI- Pacific Ocean 1; (c)TROPOMI- Pacific Ocean 2; (d) EMI- Pacific Ocean 2

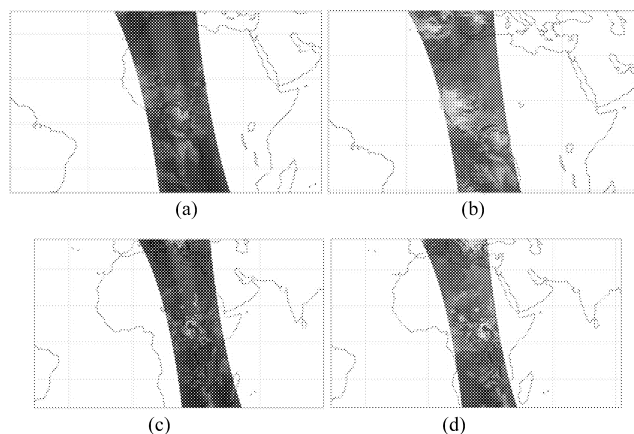


图 10 TROPOMI 与 EMI 撒哈拉沙漠区域辐亮度定标结果比较。(a)TROPOMI - 撒哈拉沙漠 1; (b) EMI - 撒哈拉沙漠 1; (c) TROPOMI - 撒哈拉沙漠 2; (d) EMI- 撒哈拉沙漠 2

Fig.10 Sahara Desert radiance between EMI and TROPOMI. (a) TROPOMI- Sahara Desert 1; (b)EMI- Sahara Desert 1; (c)TROPOMI- Sahara Desert 2; (d)EMI- Sahara Desert 2

利用在轨太阳辐射定标,由交叉比对结果可知,EMI与TROPOMI辐射定标结果的差异在5%~6.5%以内。原因为:两者的实验室定标精度与定标数据处理差异、两者观测几何条件以及测时大气条件修正后等差异(虽然对差异进行了一定修正,但不能完全排除)。

## 5 总 结

EMI辐射定标包括地球光观测光路和太阳光观测光路辐射定标,鉴于两光路的差异性,引入EMI整机BSDF方法,表征了EMI整机辐射响应特性。基于太阳光的辐照度定标,实现在轨观测时直接获取地球大气的绝对辐亮度。未来还需要对EMI基于太阳光辐照度定标作进一步的详细分析研究,提高定标精度,以提升在轨探测科学数据的质量水平和应用能力。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Keski-Kuha R A M, Blumenstock 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.
- [4] 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.
- [5] Zhao Minjie, Si Fuqi, Liu Cheng, *et al.* The effect of AO/UV/RD exposure on space-borne diffusers: A comparative experiment [J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(31): 9157-9166.
- [6] Voors R, de Vries J, Bhatti I S, *et al.* TROPOMI, the Sentinel 5 precursor instrument for air quality and climate observations: status of the current design [C]. *International Conference on Space Optics-ICSO*, 2012, **10564**: 10564Q.
- [7] De Vries J, 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.