

光学学报

大气痕量气体差分吸收光谱仪在轨辐射定标评估

苏静明^{1,2,3}, 司福祺^{1*}, 赵敏杰¹, 周海金¹, 洪炎³

¹中国科学院合肥物质科学研究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;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要 为保障大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)二级反演数据的有效性和可靠性,需长期监测仪器在轨辐射定标准确性和稳定性。首先,根据 EMI 在轨测量的太阳光谱和星下点辐亮度,计算了南极洲和格陵兰岛永久冰雪地面选定数据区域的表现反射率时间序列,并建立了太阳天顶角和表现反射率的 4 阶双向反射分布函数(BRDF)模型。然后,利用 4 阶 BRDF 模型对 2018~2020 年的表现反射率数据序列进行归一化处理,得到了表征 EMI 定标准确性和稳定性的指标。结果表明,基于 BRDF 模型得到的表现反射率预测值与实测值相关系数高于 0.9;用 BRDF 模型对表现反射率进行归一化处理,得到的仪器辐射定标不确定度范围为 2%~5%;UV2、VIS1 通道两年总衰减的范围为-0.5%~0.5%,VIS2 通道的两年总衰减约为 1.9%,即 EMI 在轨运行两年间的辐射响应稳定性较高。

关键词 大气光学; 大气痕量气体差分吸收光谱仪; 大气表现反射率; 双向反射函数分布模型; 辐射定标精度; 辐射定标稳定性

中图分类号 TP731

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0601001

On Orbit Radiometric Calibration Evaluation of Environmental Trace Gases Monitoring Instrument

Su Jingming^{1,2,3}, Si Fuqi^{1*}, Zhao Minjie¹, Zhou Haijin¹, Hong Yan³

¹Key Laboratory of Environmental Optical and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³College of Electrical and Information engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China

Abstract To ensure the validity and reliability of the secondary inversion data of environmental trace gases monitoring instrument (EMI), it is necessary to monitor the radiometric calibration accuracy and stability of the instrument in orbit for a long time. First, according to the solar spectrum and sub star radiance data measured by EMI in orbit, the surface reflectance time series of the selected data area of permanent ice and snow surface in Antarctica and Greenland are calculated, and the fourth-order bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model between the solar zenith angle and the surface reflectance is established. Then, the surface reflectance data series from 2018 to 2020 are normalized by the fourth-order BRDF model, and the indicators representing the calibration accuracy and stability of EMI are obtained. The results show that the correlation coefficient between the predicted value of surface reflectance obtained by BRDF model and the measured value is better than 0.9. After normalizing the surface reflectance with the BRDF model, the uncertainty of radiometric calibration ranges from 2% to 5%. The total attenuation of UV2 and VIS1 channels range from -5% to 5% in two years, and that of VIS2 channel is about 1.9%, which indicates that the radiation response of EMI is stable during two years of operation in orbit.

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-29; 录用日期: 2021-08-31

基金项目: 安徽省自然科学基金(1808085QD114)

通信作者: *sifuqi@aiofm.ac.cn

Key words atmospheric optics; environmental trace gases monitoring instrument; top of atmosphere reflectance; bidirectional reflectance distribution function model; radiometric calibration accuracy; radiometric calibration stability

1 引言

发射前遥感仪器的一系列实验室定标和仪器表征是在轨辐射定标性能的重要基础。发射后遥感仪器受到太空环境影响,其性能会随着时间的推移而衰减。在载荷在轨运行的整个生命周期内,为了能够持续提供准确可靠的辐射定标参数,需要对传感器在轨辐射响应性能进行长期连续跟踪监测,以便及时发现传感器辐射响应变化,进而准确评估传感器的辐射定标准确性和可靠性。

利用遥感仪器在伪不变定标点的大气表观反射率(TOA)长期序列来评估在轨辐射响应变化,是研究人员常用的监测方法^[1-2]。冰雪地表反照率高,地球散射光在总地球辐射中所占的比例低,反照率季节性变化小。南极洲和格陵兰岛冰雪表面的反射率具有很好的稳定性和均匀性,其可作为紫外和可见波长范围内的在轨辐射稳定性绝对验证参考。南极高原被冰雪永久覆盖,其具有面积大、空间均匀、坡度平缓、表面粗糙度较低和大气干净的特点,且其可见光波段反射率的年际变化均在 2% 以内^[3-4]。格陵兰岛中北部地区均匀平坦,温度常年远低于冰点,积雪表面粒度不变,具有很高的反照率,非常适合作为可见和紫外通道的校准目标^[5]。联合使用南北极冰雪目标辐射定标点可有效消除极昼极夜现象的影响,进而实现对太阳反射率波段辐射性能连续跟踪监测。

Casey 等^[6]利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)得到的 2001—2016 年间格陵兰冰盖的表观反射率和反照率趋势来评估传感器衰变校正算法的准确性。van Kempen 等^[7]通过检验 23 个伪不变辐射定标沙漠站点来评估对流层观测仪(TROPOMI)的仪器样本的信号稳定性。Jaross 通过南极冰雪双向反射模型归一化计算臭氧监测仪(OMI)得到的表观反射率与 Aura 卫星得到的表观反射率的比值、MODIS 得到的表观反射率与 Aqua 卫星得到的表观反射率的比值和多角度成像仪(MISR)得到的表观反射率与 Terra 卫星得到的表观反射率的比值,评估了冰雪表面表观反射特性^[8]。王玲等^[9]联合南北极冰雪目标对风云-3A 卫星(FY-3A)的中分辨率光谱成像仪(MERSI)对太阳反射率波段辐射性能进行了连续跟踪监测。赵敏杰等^[10]在利比亚沙漠

对大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)进行了第一年的在轨定标精度研究。众多研究表明,用南北极冰雪表面的长期表观反射率数据序列来评估仪器在轨辐射定标的准确性和稳定性是更加有效的。

本研究通过分析 EMI 载荷在轨两年来测量的 UV2、VIS1 和 VIS2 通道太阳光谱数据和地对星下点辐亮度数据来评估 EMI 长期在轨辐射定标的准确性和稳定性。首先,建立了基于冰雪表面的太阳天顶角和表观反射率的 4 阶双向反射分布函数(BRDF)模型。然后,使用该模型对南极洲和格陵兰岛的表观反射率进行归一化分析,并评估了 EMI 在轨两年(2018 年 6 月—2020 年 4 月)的辐射定标准确性和稳定性,为后续辐射定标系数衰变校正提供了参考。

2 实验仪器及数据区域

2.1 实验仪器

EMI 是 4 通道背照式帧转移面阵 CCD 探测器成像光谱仪,通过探测地球表面反射和散射的紫外及可见光辐射,利用差分光学吸收光谱(DOAS)算法反演痕量污染气体(NO_2 、 O_3 、 SO_2 、BrO 和 HCHO 等)以及气溶胶成分的分布和变化。EMI 探测波长范围为 240~710 nm,光谱分辨率范围为 0.3~0.5 nm,紫外通道 CCD 成像面尺寸为 1032 pixel×1072 pixel,可见通道 CCD 成像面尺寸为 576 pixel×1286 pixel,主要参数指标如表 1 所示。

EMI 载荷在太阳同步轨道运行时根据地面工作指令切换工作模式。载荷在太阳定标模式下,当星下点出现阴影时,打开太阳挡板,折叠镜会阻挡来自主镜的地球辐射,太阳光通过漫反射板反射到光谱仪,进而得到辐照度数据。在对地观测模式下,地球散射光经主副反射镜反射到入口的狭缝中,经过分色滤光后,通过紫外透镜和可见光透镜在光谱仪上成像,经过数据处理得到 1 级辐亮度数据。

EMI 在轨对地观测方式如图 1 所示,以天底推扫方式形成穿轨视场角为 $\pm 57^\circ$ 、沿轨视场角为 0.5° 的瞬时视场,扫描刈幅为 2600 km,空间分辨率优于 13 km×12 km,能够在 1 天内实现全球覆盖。

2.2 数据区域及有效性分析

南极东部高原选取数据样本本区域覆盖经度范围为 $0^\circ\text{E}\sim 140^\circ\text{E}$,纬度 $-85^\circ\text{S}\sim -72^\circ\text{S}$ 的地区。该区域

表 1 EMI 的主要指标

Table 1 Main indexes of EMI

Index	Value
Spectral range /nm	UV1: 240–315; UV2: 311–403; VIS1: 401–550; VIS2: 545–710
Spectral resolution /nm	0.3–0.5
Spectral accuracy /nm	≤0.05
Total field of view / (°)	±57(2600 km×6.5 km)
CCD detector / (pixel×pixel)	UV: 1032 (space dimension)×1072 (spectral dimension); VIS: 576 (space dimension)×1286 (spectral dimension);
Spatial resolution / (km×km)	UV: 13 (flight direction)×8 (swath direction, binning factor is 4 in swath direction); VIS: 13 (flight direction)×12 (swath direction, binning factor is 4 in swath direction);

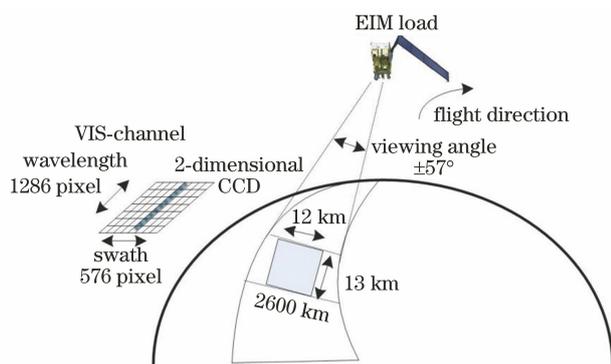


图 1 EMI 对地观测方式

Fig. 1 Earth observation mode of EMI

冰雪表面范围较大,海拔高于 3 km,地表坡度小,故可以忽略表面坡度对 BRDF 和表观反射率均匀性的影响。南极高原地区的表观反射率高,受雪和云量变化的影响最小^[11]。格陵兰中北部(经度范围为 $-45^{\circ}\text{W}\sim 35^{\circ}\text{W}$,纬度范围为 $72^{\circ}\text{N}\sim 78^{\circ}\text{N}$)海拔在 3 km 左右的区域,冰雪表面均匀平坦,温度远低于冰点,由细粒雪组成,污染可以忽略不计。该区域具有很高的反照率,适合作为可见和近紫外通道的校准目标^[4]。由于光学仪器使用的是太阳反射波段,故为了避免南北极极昼极夜现象引起的数据不连续,本研究联合南极洲和格陵兰岛的极昼时期进行全年辐射定标跟踪,选取 EMI 得到的每年格陵兰岛 4–9 月的观测数据和南极洲 10 月到次年 3 月的 L1B 观测数据集。

南北极冰雪表面表观反射率高,高原地区出现的云层对 TOA 反射率的影响很小,南北极数据区域统计特性在选定的样本区域内呈狭窄的高斯分布,表明了云在数据统计上的不显著性,因此在本研

究中忽略了云和地形因素对表观反射率的影响^[12]。

EMI 在南北极选定区域、选定时间范围(南极洲的时间范围为 2018 年 10 月–2019 年 3 月,格陵兰岛的时间范围为 2019 年 4 月–2019 年 9 月)计算波长为 340 nm 情况下的星下点的归一化表观反射率,统计分布如图 2 所示。南极洲选定区域表观反射率的高斯拟合标准差为 0.5%,格陵兰岛表观反射率的高斯拟合标准差为 0.9%,密度函数最大的点均是 1.004。因为南极洲东部高原具有极低的温度、典型的干燥细粒雪和全大陆最高的反射率,所以其表观反射率随时间的变化基本保持稳定。格陵兰岛统计分布图的底部覆盖范围较大,标准差偏大,稳定性略低,可能是其冰盖每隔几年就会受北方森林大火所产生的空气粒子或广泛的地表融化的影响,这在一定程度上影响了表观反射率的稳定性^[4]。总体而言,南北极冰雪表面的表观反射率在 0.9 以上,利用南北极数据计算得到的高斯拟合标准差均小于 1%,表明地形和云因素不会明显影响南北极的表观反射率结果,联合南北极数据对辐射定标精度和稳定性评估是完全可行的。

3 方 法

3.1 表观反射率的计算及太阳天顶角的影响

假设大气层顶为朗伯体反射面,太阳光以天顶角 θ_s 入射到该面,根据朗伯反射率定义计算表观反射率的表达式为

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{\pi L D^2}{E_{\text{sun}} \cos \theta_s}, \quad (1)$$

式中: L 为卫星传感器测量的辐亮度,其单位为

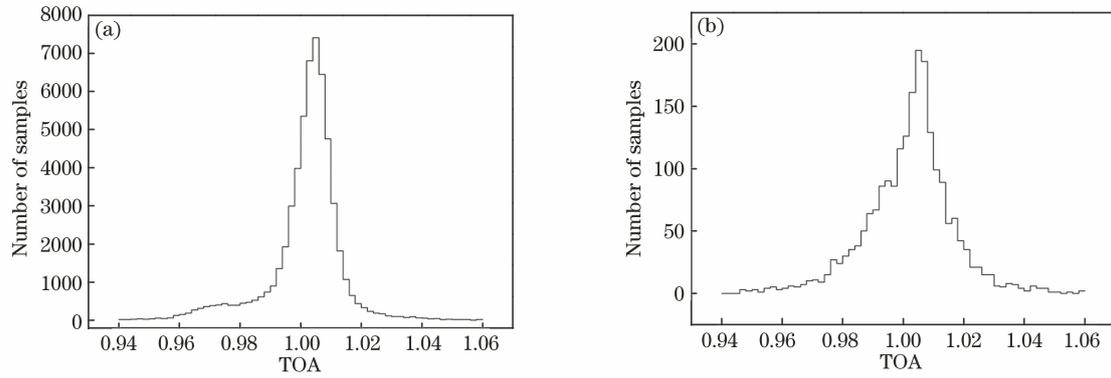


图 2 EMI 得到的南极洲和格陵兰岛数据区域的 TOA 统计特性。(a)南极洲;(b)格陵兰岛

Fig. 2 Statistical characteristics of TOA in data areas of Antactica and Greenland obtained by EMI.

(a) Antarctica; (b) Greenland

$W \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; D 为日地距离, 其单位为 A. U. ($1 \text{ A. U.} = 1.4959787 \times 10^8 \text{ km}$); E_{sun} 为利用卫星传感器测量得到的太阳辐照度, 其单位为 $W \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

由于痕量气体吸收峰会影响仪器辐亮度的测量值, 特别是波长小于 330 nm 的辐亮度依赖于臭氧的估计, 故为避免臭氧吸收峰对表现反射率的影响, 在 UV2 通道选取 340 nm 和 360 nm, 在 VIS1 通道选取 420 nm 和 460 nm, 在 VIS2 选取 580 nm 和 600 nm 波长计算表现反射率数据集^[11]。选取的波长处于各通道中心, 间隔远大于载荷的光谱分辨率, 可以反映该通道辐射定标的稳定性和可靠性。

BRDF 在太阳天顶角较小的情况下的特性近似于朗伯体特性, 当太阳天顶角较大时, 前向散射明显增大^[11]。分析 EMI 得到的南极区域在波长为 340, 420, 580 nm 情况下的星下点数据, 在不同太阳天顶角下表现反射率的均值和标准差如图 3 所示。340 nm 波长情况下的表现反射率均值相对稳定, 标准差小于 1%。420 nm 波长情况下的标准差约为 5%, 变化幅度大于 340 nm 情况。580 nm 波长情况下的表现反射率变化幅度最为剧烈, 标准差约为 10%。由图 3 可见, 当太阳天顶角小于 80° 时, 在紫外和不同可见光波长下采用多项式拟合均能有效表达表现反射率和太阳天顶角之间的关系。

3.2 冰雪目标双向反射分布函数效应的订正

南北极地区纬度高, 太阳天顶角通常比较大, 需要对冰雪表面的 BRDF 效应进行归一化计算, 以消除由瑞利散射和表面的非朗伯反射引起的表现反射率的变化。建立太阳天顶角和表现反射率 4 次多项式 BRDF 模型, 表现反射率与太阳天顶角余弦间的关系为

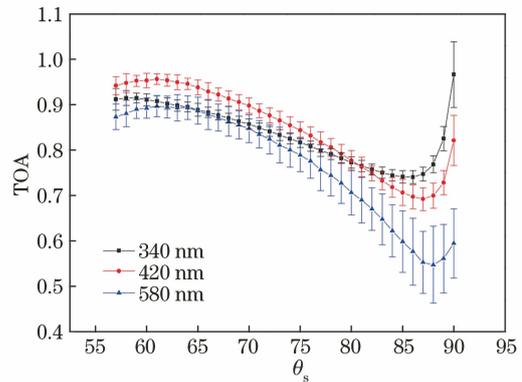


图 3 TOA 随 θ_s 的变化

Fig. 3 TOA varying with θ_s

$$R_{\text{BRDF}} = k_0 + k_1 \cdot \cos \theta_s + k_2 \cdot \cos^2 \theta_s + k_3 \cdot \cos^3 \theta_s + k_4 \cdot \cos^4 \theta_s + k_5 \cdot \cos^5 \theta_s, \quad (2)$$

式中: R_{BRDF} 是 BRDF 模型预测的表现反射率; $k_0 \sim k_5$ 是 4 次多项式模型的拟合系数。使用(2)式将表现反射率归一化为角度影响基本可以忽略的参量 R_{TOA} , R_{TOA} 的表达式为

$$R_{\text{TOA}} = \rho_{\text{TOA}} / R_{\text{BRDF}}. \quad (3)$$

4 结果与讨论

4.1 冰雪目标表现反射率双向反射分布函数的建模

为获取最大范围的太阳天顶角, 选取 2018 年 12 月期间所有太阳天顶角在 80° 以内的 L1 级辐亮度数据建立冰雪目标表现反射率 BRDF 模型。图 4 和图 5 分别代表南极和格陵兰岛所选数据区域计算得到的表现反射率随 $\cos \theta_s$ 分布的 4 阶 BRDF 模型。相应模型的拟合系数、实测表现反射率和模型预测值的相关系数 R^2 和均方根误差(RMSE)如表 2 和表 3 所示。

由图 4 和表 2 所示, 南极洲数据区域的模型预测值和实测值相关系数较高, UV2 通道相关性最

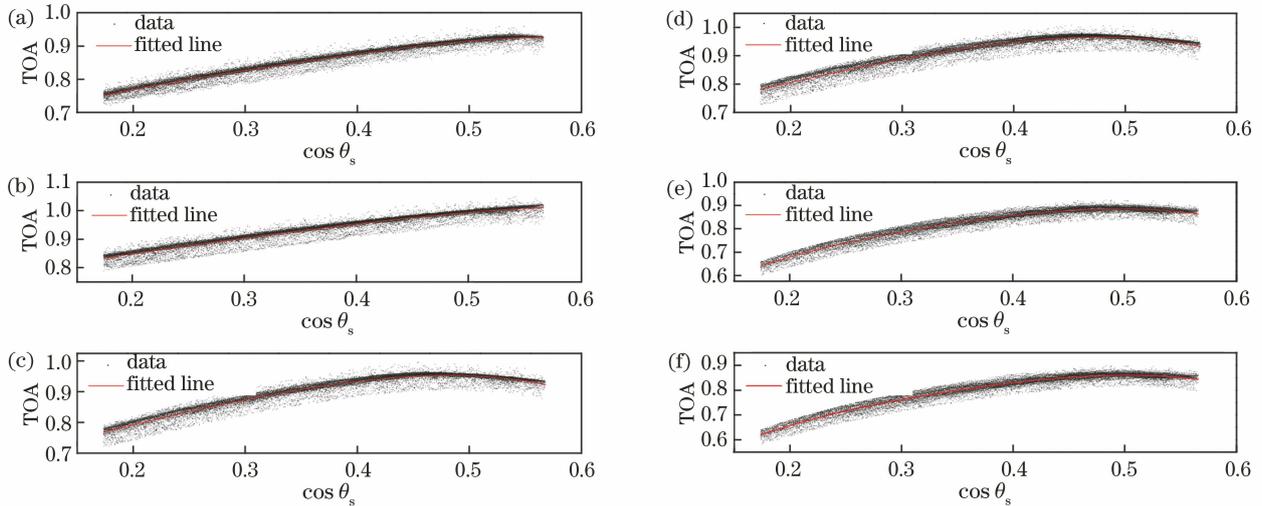


图 4 不同波长情况下的南极洲 4 阶 BRDF 模型。(a) 340 nm; (b) 360 nm; (c) 420 nm; (d) 460 nm; (e) 580 nm; (f) 600 nm

Fig. 4 Fourth-order BRDF models of Antarctica at different wavelengths. (a) 340 nm; (b) 360 nm; (c) 420 nm; (d) 460 nm; (e) 580 nm; (f) 600 nm

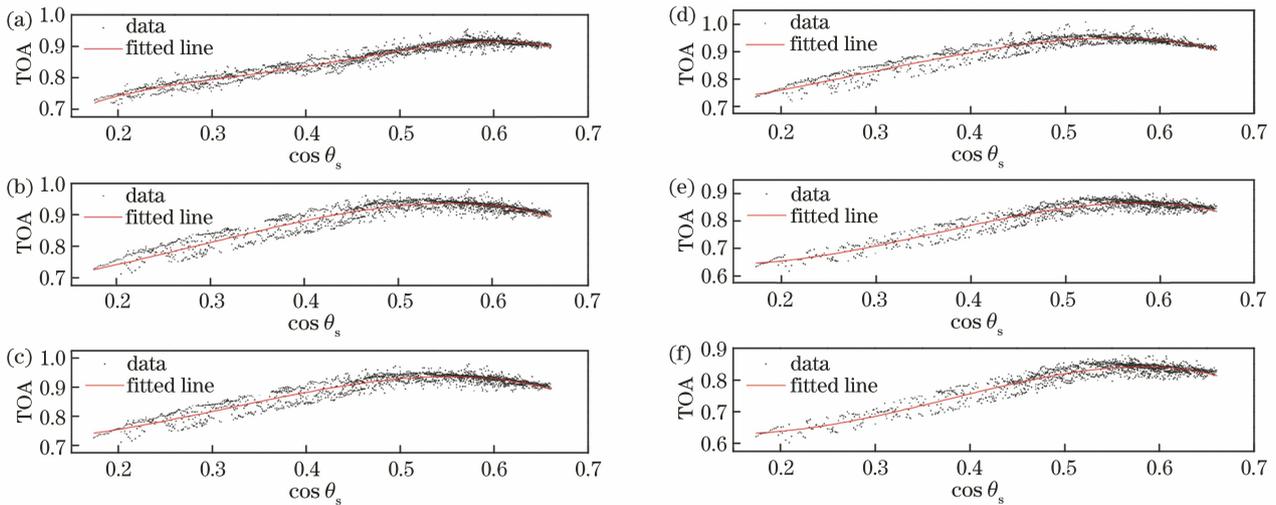


图 5 不同波长情况下的格陵兰岛 4 阶 BRDF 模型。(a) 340 nm; (b) 360 nm; (c) 420 nm; (d) 460 nm; (e) 580 nm; (f) 600 nm

Fig. 5 Fourth-order BRDF models of Greenland at different wavelengths. (a) 340 nm; (b) 360 nm; (c) 420 nm; (d) 460 nm; (e) 580 nm; (f) 600 nm

表 2 南极洲 4 阶 BRDF 模型的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of fourth-order BRDF model of Antarctica

Channel	Wavelength /nm	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	R^2	RMSE
UV2	340	0.5544	1.7801	-5.2263	9.9608	-7.4824	0.9630	0.0100
	360	0.6755	1.2769	-3.0360	5.7084	-4.3917	0.9416	0.0128
VIS1	420	0.5527	1.6586	-3.4727	7.3200	-7.6232	0.9440	0.0131
	460	0.5744	1.5196	-2.7161	5.7622	-6.5744	0.9332	0.0141
VIS2	580	0.1730	4.3089	-12.5960	21.6051	-15.8983	0.9481	0.0147
	600	0.1414	4.4724	-13.3826	22.7426	-16.2404	0.9468	0.0145

表 3 格陵兰岛 4 阶 BRDF 模型的拟合参数
Table 3 Fitting parameters of fourth-order BRDF model of Greenland

Channel	Wavelength /nm	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	R^2	RMSE
UV2	340	0.3081	4.4584	-16.5294	29.1641	-18.6481	0.9482	0.0119
	360	0.4691	3.1984	-10.6894	17.9890	-10.9782	0.9386	0.0151
VIS1	420	0.7149	-0.2122	2.4285	-1.4473	-1.7026	0.8837	0.0174
	460	0.6629	0.2787	1.1021	0.0486	-2.2849	0.9059	0.0160
VIS2	580	0.7166	-1.1242	4.7845	-3.3452	-1.3791	0.9015	0.0170
	600	0.6937	-0.9265	3.5245	-0.8956	-2.8788	0.9015	0.0166

大,达到 0.963,可见通道(VIS1)相关性最低,约为 0.933。南极洲冰雪模型拟合的 RMSE 低于 0.015。

由图 5 和表 3 所示,格陵兰岛所选数据区域的 BRDF 模型预测值和实测值之间的相关系数略低于南极洲,其最大值在 UV2 通道处,达到 0.9482。可见通道(VIS1)的相关性最低,约为 0.8837。格陵兰岛冰雪模型拟合的 RMSE 低于 0.017。

结果表明,南北极数据区域的表观反射率 BRDF 模型相关系数较高,均在 0.93 以上,最高为 UV2 通道,最低为可见通道 VIS1。两个冰雪目标的模型精度也具有有一致性,短波长拟合精度更高。南极洲冰雪表面拟合的 RMSE 低于 0.015,略优于格陵兰岛(0.0174),且南极洲冰雪目标上表观反射率相比格陵兰岛更加稳定。

4.2 归一化表观反射率变化趋势

在 EMI 发射前进行了一系列实验室定标和仪器表征^[13-15],如果仪器入轨后辐射响应长期稳定,归一化表观反射率 R_{TOA} 应保持为 1 不变, R_{TOA} 的变化量可体现仪器辐射定标的稳定性。选取 EMI 南北极数据区域(时间为 2018 年 6 月-2020 年 4 月)在轨测量的太阳光谱和星下点辐亮度观测数据计算

归一化表观反射率监测时间序列,并进行线性拟合,结果如图 6 所示。其中,矩形点(Greenland)、圆点(Antarctica)表示不同时间观测到的归一化表观反射率 R_{TOA} ,实线表示线性拟合。表 4 列出了 EMI 的归一化表观反射率时间序列线性拟合模型参数、不确定性统计相关系数及衰变分析相关系数。

图 6 和表 4 给出了 EMI 入轨后衰变监测的结果,其中归一化表观反射率的标准偏差表示了辐射定标的不确定性,总衰变(total drift)表示辐射响应稳定性。如图 6 所示, R_{TOA} 的变化幅度随着波长的增大逐渐变大,这可能是因为在较大波长处,大气中的米氏散射对整体散射光分布的影响较大。即使尽量降低波长相关性的影响,归一化表观反射率中仍然存在残留的变化量,故其在南极和北极测量时间段内会出现小的波动。在南极和北极观测时间的交界处,表观反射率存在年内跳跃,这可能是因为在时间交接处南北极太阳天顶角通常比较大,此时存在残余的太阳天顶角变化量。此外,云量和季节性变化也会对其产生影响^[8]。

如表 4 所示,EMI 的 UV2、VIS1 的通道辐射响应精度较高,不确定性在 2% 以内。在辐射响应总

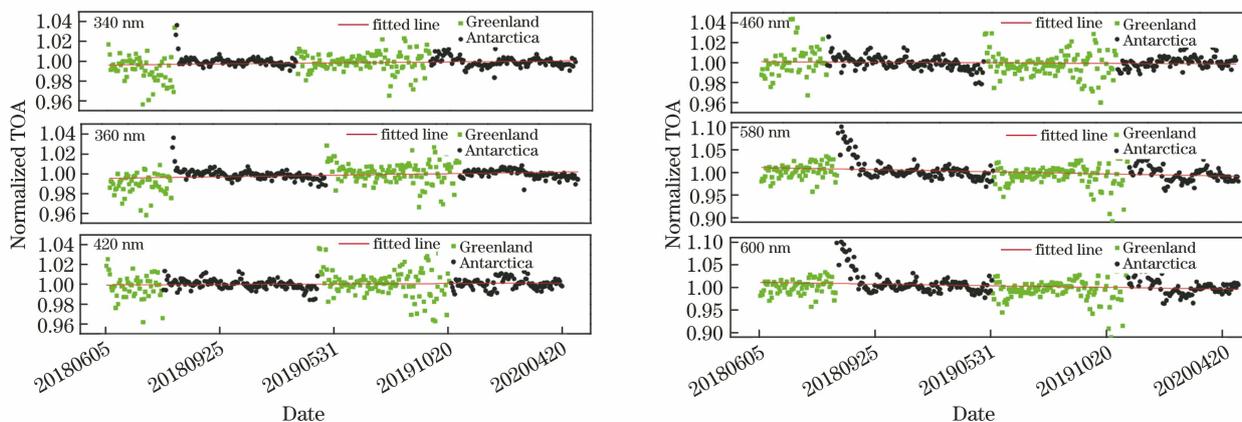


图 6 南极洲和格陵兰岛的归一化 TOA 时间序列及辐射响应衰变监测结果

Fig. 6 Times series and radiation response degradation results of normalized TOA over Antarctica and Greenland

表 4 EMI 的表观辐射响应时间序列监测模型参数、不确定性统计及衰变分析

Table 4 Parameters of surface radiation response time series monitoring model, uncertainty statistics and decay analysis of EMI

Channel	Wavelength /nm	Intercept	Slope	Standard deviation /%	Total drift /%
UV2	340	0.996219	0.000010	1.7104	0.4199
	360	0.995436	0.000016	1.7237	0.6491
VIS1	420	0.999276	0.000005	1.8893	0.1949
	460	1.000994	-0.000006	1.9864	-0.2399
VIS2	580	1.010591	-0.000046	4.8066	-1.9114
	600	1.011024	-0.000037	5.1285	-1.5165

衰变方面,UV2、VIS1 通道衰变的范围为 $-0.5\% \sim 0.5\%$ 。VIS2 通道内的 580 nm、600 nm 波长处不确定性约为 5%,两年总衰减约为 1.9%,比 UV2 和 VIS1 通道的数值大,这可能是受到 O_3 、 O_4 在该波长附近吸收峰的少量影响,故需要更长时间的跟踪观测来最小化观测误差。总体来看,EMI 辐射定标两年来表现非常稳定,OMI 的辐射响应年衰变 UV2 通道约为 1.5%、VIS 通道约为 1%^[16]。TROPOMI 自 2017 年发射以来,短波红外(SWIR)模块每年的衰变约为 0.3%^[7]。本研究结果与国际同类卫星、TROPOMI 监测结果类似。

5 结 论

假定 EMI 在轨期间南极洲和格陵兰岛冰雪表面反射率没有变化,计算两个伪不变定标区域的表观反射率。建立 4 阶双向反射 BRDF 模型并对表观反射率进行归一化处理,以消除太阳天顶角变化对表观反射率的影响。利用该方法获得了 EMI 在 2018 年 6 月—2020 年 4 月期间连续完整的辐射响应时间序列,并导出了表征光学仪器辐射定标不确定性和稳定性的变化参量。研究表明,EMI 的辐射响应变化量与波长相关,UV2、VIS1 通道不确定性小于 2%,VIS2 通道的不确定性约为 5%,辐射定标准确性较好。UV2 和 VIS1 通道衰变的范围为 $-0.5\% \sim 0.5\%$,VIS2 通道两年总衰减约为 1.9%,辐射响应稳定性较高。研究结果进一步表明 EMI 整体辐亮度定标在入轨两年间变化较小,与国际同类卫星性能相近。通过持续分析南北极辐射定标准确性和衰变程度,为后期适时更新辐射定标系数提供有力参考,进一步保障了大气痕量气体二级反演数据的准确性和辐射定标的精度。

参 考 文 献

[1] Chen F N, Fan Y Z, Hong J, et al. In-flight radiation calibration of a directional polarimetric

camera at visible bands onboard GF-5 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2328001.

陈斐楠,樊依哲,洪津,等.高分五号多角度偏振探测仪可见光波段在轨辐射定标研究[J].*光学学报*, 2020, 40(23): 2328001.

[2] He X W, Han Q, Feng X H, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared bands of FY-3B MERIS[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1828001.

何兴伟,韩琦,冯小虎,等. FY-3B 卫星 MERIS 可见光近红外波段定标精度评估[J].*光学学报*, 2020, 40(18): 1828001.

[3] Uprety S, Cao C Y. Suomi NPP VIIRS reflective solar band on-orbit radiometric stability and accuracy assessment using desert and Antarctica Dome C sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 106-115.

[4] Huang L K, Cebula R P, Taylor S L, et al. Determination of NOAA-11 SBUV/2 radiance sensitivity drift based on measurements of polar ice cap radiance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(2): 305-314.

[5] Weaver C J, Bhartia P K, Wu D L, et al. Inter-calibration of nine UV sensing instruments over Antarctica and Greenland since 1980 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(10): 5715-5723.

[6] Casey K A, Polashenski C M, Chen J, et al. Impact of MODIS sensor calibration updates on Greenland Ice Sheet surface reflectance and albedo trends [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1781-1795.

[7] van Kempen T A, Oggioni F, van Hees R M. Monitoring the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) short-wave infrared (SWIR) module instrument stability using desert sites [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(10): 6711-6722.

[8] Xiong X X, Wu A S, Wenny B N. Using Dome C for moderate resolution imaging spectroradiometer calibration stability and consistency [J]. *Journal of*

- Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 033520.
- [9] Wang L, Hu X Q, Zheng Z J, et al. Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in south and north poles[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212003.
王玲, 胡秀清, 郑照军, 等. 联合南北极冰雪目标的 FY-3A/MERSI 辐射定标跟踪监测 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0212003.
- [10] Zhao M J, Si F Q, Wang Y, et al. First year on-orbit calibration of the Chinese environmental trace gas monitoring instrument onboard GaoFen-5 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(12): 8531-8540.
- [11] Jaross G, Warner J. Use of Antarctica for validating reflected solar radiation measured by satellite sensors [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113 (D16): D16S34.
- [12] Jaross G, Krueger A J, Flittner D. Multispectral calibration of remote-sensing instruments over Antarctica[J]. Metrologia, 1998, 35(4): 625-629.
- [13] Zhao M J, Si F Q, Zhou H J, et al. Preflight calibration of the Chinese environmental trace gases monitoring instrument (EMI) [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(9): 5403-5419.
- [14] Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, et al. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2331-2337.
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杂散光抑制 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331-2337.
- [15] Zhou H J, Zhao M J, Jiang Y, et al. Design and in-orbit performance of the Chinese environmental trace gases monitoring instrument [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 154-160.
周海金, 赵敏杰, 江宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪设计及标定技术 [J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 154-160.
- [16] Schenkeveld V M E, Jaross G, Marchenko S, et al. In-flight performance of the ozone monitoring instrument [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(5): 1957-1986.