

光学学报

基于深对流云的 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应评估

张北^{1,2}, 胡秀清^{1,2*}, 周为伟³, 王玲^{1,2}, 陈林^{1,2}, 张鹏^{1,2}

¹中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心 (国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

²许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

³河南理工大学测绘与国土信息学院, 河南 454003

摘要 风云三号 D 星 (FY-3D) 中分辨率光谱成像仪 II 型 (MERSI-II) 已在轨运行超过 5 年, 经定量应用反演发现部分通道辐射响应性能出现明显退化。本研究采用深对流云 (DCC) 目标对 MERSI-II 大部分反射太阳波段辐射响应变化进行趋势评估, 为提高该方法的稳定性, 对基础 DCC 定标方法进行了优化。首先, 比较了当前两种 DCC 双向反射分布函数 (BRDF) 模型的校正效果, 采用月度反射率概率密度函数 (PDF) 众数和均值分别对反射率长时间序列稳定性进行分析。结果表明: 对可见光和近红外波段使用 CERES 厚冰云 BRDF 模型校正的反射率 PDF 众数较优; 短波红外波段反射率 PDF 均值较优, 但对于两种 BRDF 模型均不敏感。其次, 针对 BRDF 模型在短波红外波段无明显校正效果的问题, 提出了一种基于反射率拟合残差和滑动平均值的去季节性方法。该方法显著改善了 2018—2022 年短波红外波段月度 DCC 反射率序列的相对标准差和波动性, 分别降低了约 22.2% 和 53%。这种去季节性方法为其他卫星光学传感器基于 DCC 目标的辐射定标研究提供了参考。最后, 使用上述方法对 MERSI-II 的 11 个反射太阳波段辐射响应进行定量评估, 发现蓝光通道和全部短波红外通道出现显著衰减, 该评估结果将作为 FY-3D/MERSI-II 业务定标更新的重要参考依据。

关键词 遥感和传感器; 辐射定标; 深对流云; 双向反射分布函数; 中分辨率光谱成像仪

中图分类号 TP732 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230842

1 引言

卫星遥感数据在气象、海洋、环境、地质、农牧业等诸多领域发挥着日益重要的作用, 卫星传感器辐射定标精度是遥感数据量化应用的基础和关键^[1]。卫星在轨运行期间会受到空间环境和元器件老化等因素的影响, 星载传感器的辐射响应性能将会不可避免地出现衰退。因此, 需要对卫星传感器的辐射响应性能进行长期监测评估, 并依据评估结果进行业务定标更新^[2-10]。然而, 由于传感器设计和卫星平台约束等因素的限制, 只有部分卫星配备了星上定标系统。因此, 在轨替代定标方法是监测和校准传感器辐射响应性能的重要手段。

基于深对流云 (DCC)、沙漠 (非洲、南美洲和我国西北) 和南北极冰川 (Dome C 和 Greenland) 等稳定地球目标的在轨替代定标方法是被广泛采用的卫星传感器辐射性能监测手段^[11]。与传统的沙漠、冰川等目标相比, DCC 具有更高的信噪比以及接近朗伯体

(Lambertian) 各向同性的反射特征^[12]。此外, 由于 DCC 位于对流层顶部, 其反射率受大气中的水汽和气溶胶吸收影响非常小^[13], 因此能够对水汽吸收光谱波段进行更精确的分析。基于 DCC 目标的定标方法适用于大多数在轨运行的反射太阳波段传感器, 目前已被全球天基卫星交叉定标系统 (WMO / GSICS) 列为优先采用的可见光 (VIS) 至短波红外 (SWIR) 波段替代定标方案之一^[14]。

近年来, 国内外学者已经在基于 DCC 目标的卫星传感器辐射性能评估方面开展了诸多研究工作^[15-27]。Hu 等^[24]最早根据红外通道亮温阈值识别 DCC 目标, 并通过跟踪月度 DCC 反照率变化评估 MODIS 等传感器的辐射性能。Doelling 等^[25]使用具有高定标精度的 Aqua/MODIS 传感器数据, 从多角度研究了 DCC 特征, 其对 Aqua/MODIS 传感器的长期监测结果表明, 在 0.65 μm 可见光波段, DCC 反射率每十年的变化率在 0.2% 以内, 证明了 DCC 目标的稳定性。Wang 等^[26]指出, 相比于可见光和近红外 (NIR) 波段, 短波红

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-06-05; 录用日期: 2023-07-18; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3902901)

通信作者: *huxq@cma.cn

外波段 DCC 反射率表现出更大的季节性周期波动。但是,目前常用的 DCC 双向反射分布函数(BRDF)校正模型对于 SWIR 波段几乎没有校正效果。因此,本文在分析了 DCC 季节性特征的基础上,提出一种基于反射率拟合残差和滑动平均值去季节性方法,可以弥补目前常用的 BRDF 校正模型在 SWIR 波段无效的不足。此外,DCC 定标是一种依赖大量像元数据样本的统计方法,Wang 等^[27]在分析 VIIRS(Visible infrared Imaging Radiometer)观测结果时发现对于 VIS/NIR 波段,DCC 反射率概率密度函数(PDF)众数比均值具有更好的稳定性,本文对比了 DCC 反射率 PDF 众数和均值对 FY-3D 中分辨率光谱成像仪(MERSI-II)定标结果的影响,并根据不同波段给出了最优方案。

FY-3D/MERSI-II 已在轨运行超过 5 年,其辐射响应性能出现了明显退化,影响了后端定量遥感产品的精度。为了改进基于 DCC 目标的 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应评估方法的精度和稳定性,本文首先比较了 Hu 模型和云与地球辐射能量系统(CERES)厚冰云 BRDF 模型的校正效果,以及 DCC 反射率 PDF 众数和均值的稳定性。其次,针对 DCC 的 BRDF 校正模型在 SWIR 波段无效的问题,分析了 DCC 的季节性特征,提出了一种基于 DCC 反射率拟合残差和滑动平均值去季节性方法,并与 BRDF 模型比较校正效果,建立了优化后的 DCC 定标方法。最后,使用优化方法对 2018—2022 年 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段的辐射响应衰减情况进行了定量评估,该评估结果将作为 MERSI-II 反射太阳波段业务定标更新的重要依据。

2 仪器和数据

FY-3D 是我国第二代极轨气象卫星,于 2017 年 11 月 15 日在太原卫星发射中心成功发射,卫星轨道高度约 830 km,倾角约 98.75°,绕地球飞行一圈约 102 min,卫星每天可以完成一次全球覆盖观测。FY-3D 星上搭载了 10 套先进的遥感仪器,探测数据主要用于天气预报、大气化学、大气定量探测和气候变化监测业务及研究等方面^[1]。

MERSI-II 是 FY-3D 最重要的光学成像仪器,它使用 45°扫描镜并在消旋 K 镜协同下观测地球,扫描周期为 1.5 s,可对星下点±55°的视场进行对地观测,每次扫描提供约 2900 km(跨轨)×10 km(沿轨,星下点)的扫描带,可实现每天一次的全球扫描覆盖^[11]。MERSI-II 具有 19 个反射太阳通道(0.41~2.13 μm)和 6 个红外发射通道(3.8~12 μm),采用多探元(10 或 40 个)并扫,星下点地面瞬时视场为 250 m 或 1000 m,可以每日无缝隙获取全球 250 m 分辨率真彩色图像,实现云、气溶胶、水汽、陆地表面特性、海洋水色等大气、陆地、海洋参量的高精度定量反演^[28],其光谱通道主要指标如表 1 所示,包括中心波长、光谱带宽、空间

分辨率和动态范围。

表 1 FY-3D/MERSI-II 光谱通道指标

Table 1 FY-3D/MERSI-II spectral channel specifications

Band	Central wavelength / μm	Spectra bandwidth / μm	Resolution / m	Dynamic range
1	0.470	50	250	90%
2	0.550	50	250	90%
3	0.650	50	250	90%
4	0.865	50	250	90%
5	1.380	20/30	1000	90%
6	1.640	50	1000	90%
7	2.130	50	1000	90%
8	0.412	20	1000	30%
9	0.443	20	1000	30%
10	0.490	20	1000	30%
11	0.555	20	1000	30%
12	0.670	20	1000	30%
13	0.709	20	1000	30%
14	0.746	20	1000	30%
15	0.865	20	1000	30%
16	0.905	20	1000	100%
17	0.936	20	1000	100%
18	0.940	50	1000	100%
19	1.030	20	1000	100%
20	3.800	180	1000	200-350 K
21	4.050	155	1000	200-380 K
22	7.200	500	1000	180-280 K
23	8.550	300	1000	180-300 K
24	10.800	1000	250	180-330 K
25	12.000	1000	250	180-330 K

本研究使用的数据为 FY-3D/MERSI-II 在轨稳定运行后的近五年(2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日),经过地理定位和辐射定标处理后的 L1 级地球观测数据。DCC 是大气层顶的明亮目标,而通道 8 至通道 15 的最大反射率动态范围为 30%,当观测高亮度的 DCC 目标时,这些波段可能会饱和。因此,本研究的对象是 MERSI-II 光谱范围内的 11 个反射太阳波段,即通道 1~7 和通道 16~19。其中包括 3 个可见光通道,5 个近红外通道以及 3 个短波红外通道。

3 研究方法

本文基于 DCC 目标对 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应变化进行趋势评估,图 1 展示了研究方法的总体流程。首先,根据红外(IR)10.8 μm 通道亮温(BT)阈值、观测几何条件(纬度、太阳天顶角、观测天顶角)和空间均一性条件识别 DCC 目标像元。其次,对识别到的每个 DCC 像元反射率进行太阳天顶角

(SZA)和日地距离(DES)校正,得到DCC表观反射率。然后使用两种深对流云BRDF模型对DCC表观反射率进行各向异性校正并对比校正效果。接着,构建月度DCC反射率PDF。最后,通过跟踪月度DCC

反射率PDF均值或众数序列来评估MERSI-II的辐射响应变化趋势。本节研究了DCC的季节性特征并提出了一种去季节性方法,以降低反射率PDF均值或众数序列的波动性。

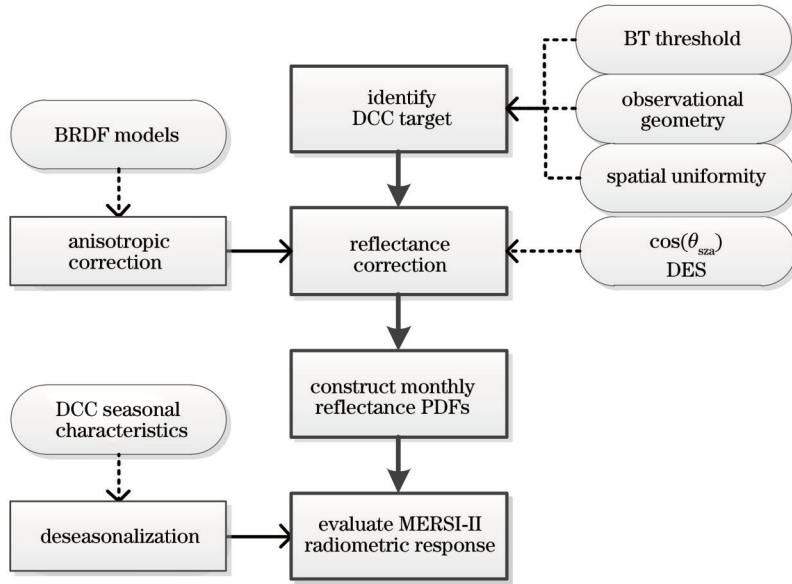


图1 基于DCC目标的MERSI-II辐射响应评估方法总体流程

Fig. 1 Flowchart of the MERSI-II radiometric response evaluate method based on DCC

3.1 识别DCC目标像元

DCC目标像元的准确识别是这项研究工作的基础。首先,选择纬度小于20°的热带地区像元,检测红外波段10.8 μm波长通道并筛选出亮温小于205 K的像元,实现对DCC目标的初步识别。其次,为了更多地利用DCC的近似朗伯体反射特性,选择太阳天顶角和观测天顶角(VZA)同时小于40°的像元。最后,为了避免DCC边缘部分、薄云和小尺度对流单体的影响,仅对DCC核心区域进行分析,通过计算所识别到的像元和其周围3×3区域8个相邻像元的反射率和亮温标准偏差进行空间均一性判别,筛选出同时满足相邻3×3区域像元可见光波段0.65 μm通道反射率标准偏差小于3%和红外波段10.8 μm通道亮温标准偏差小于1 K的像元。

3.2 各向异性校正

尽管在太阳天顶角和观测天顶角较低的情况下,DCC具有近似朗伯体的反射特征,但DCC并不是完美的朗伯体,由于各向异性的存在,DCC反射率会发生偏差,从而影响定标结果的可靠性。Hu等^[24]使用热带降水测量任务卫星(TRMM)的观测数据建立了深对流云角度分布模型(ADM),并基于非线性回归神经网络将宽波段的ADM转换为可应用于可见光成像仪的窄波段ADM。CERES基于Aqua、Terra和TRMM等卫星的高定标精度观测数据,建立了云量大于99.9%且云光学厚度大于50的厚冰云ADM,该ADM具体参数可在CERES官方网站获取。这两种模型作

为DCC的BRDF模型,在基于DCC目标的传感器辐射定标研究领域被广泛认可和使用^[12-20]。每一个DCC像元都对应一组太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。BRDF模型将DCC像元反射率划分到一组角度区间内,再通过BRDF校正因子将DCC反射率归一化到同一组特定的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角上,目的是消除不同角度下的DCC反射率偏差,表示为

$$F_{\text{BRDF}}(\theta_{\text{sza}}, \theta_{\text{vza}}, \theta_{\text{raa}}) = \frac{R(\theta_{\text{sza}}, \theta_{\text{vza}}, \theta_{\text{raa}})}{R(\theta_0, \theta, \eta)}, \quad (1)$$

式中: $F_{\text{BRDF}}(\theta_{\text{sza}}, \theta_{\text{vza}}, \theta_{\text{raa}})$ 表示在某一组太阳天顶角(θ_{sza});观测天顶角(θ_{vza})和相对方位角(θ_{raa})上的BRDF校正因子; $R(\theta_{\text{sza}}, \theta_{\text{vza}}, \theta_{\text{raa}})$ 表示在这一组角度上的DCC反射率; $R(\theta_0, \theta, \eta)$ 表示在一组特定角度上的DCC反射率(θ_0, θ, η 分别表示特定的太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角)。最终,经过BRDF模型、日地距离和太阳天顶角校正后的DCC像元表观反射率为

$$R_{\text{COR},i} = \frac{D_{\text{ES}}^2 \times R_{\text{CAL},i}}{\cos(\theta_{\text{sza}}) \times F_{\text{BRDF}}(\theta_{\text{sza}}, \theta_{\text{vza}}, \theta_{\text{raa}})}, \quad (2)$$

式中: $R_{\text{COR},i}$ 是MERSI-II第*i*通道校正后的DCC像元表观反射率; $R_{\text{CAL},i}$ 是根据MERSI-II第*i*通道业务定标系数和观测计数值(DN)计算出的DCC像元定标反射率; D_{ES} 是日地距离校正因子; $F_{\text{BRDF}}(\theta_{\text{sza}}, \theta_{\text{vza}}, \theta_{\text{raa}})$ 表示该DCC像元对应的一组太阳天顶角(θ_{sza})、观测天顶

角(θ_{vza})和相对方位角(θ_{raa})上的 BRDF 校正因子。

通过构建月度 DCC 反射率在不同观测天顶角区间的 PDF 来直观地评估 BRDF 模型的校正效果。本研究使用高斯核密度估计方法计算月度 DCC 反射率的 PDF, 表示为

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma h} \exp \left[-\frac{(x - x_i)^2}{2\sigma^2 h^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 表示月度 DCC 反射率 PDF; x 表示 DCC 像元反射率; n 表示月度 DCC 像元样本数量; σ 表示月度 DCC 像元反射率样本标准差; h 表示带宽。可以预见的是,如果 BRDF 模型能够完全校正 DCC 反射率的各

向异性,那么所有随观测天顶角变化的 PDF 曲线应该完全重合。图 2(a)、(b)分别展示了 MERSI-II 可见光波段 $0.65 \mu\text{m}$ 通道和短波红外波段 $1.64 \mu\text{m}$ 通道月度 DCC 反射率在没有 BRDF 校正、Hu 模型和 CERES 厚冰云模型校正后,不同观测 VZA 角度区间的 PDF 曲线。为了在每个 VZA 区间获得足够多的 DCC 像元样本以保证反射率 PDF 的稳定性,将角度区间设置为 10° 。图中还给出了 4 个 VZA 角度区间的反射率均值(mean)以及众数(mode)的标准偏差(std)。表 2 完整展示了 11 个 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段在 Hu 和 CERES 厚冰云模型校正前后,4 个 VZA 角度区间反射率 PDF 均值(众数)的标准偏差。

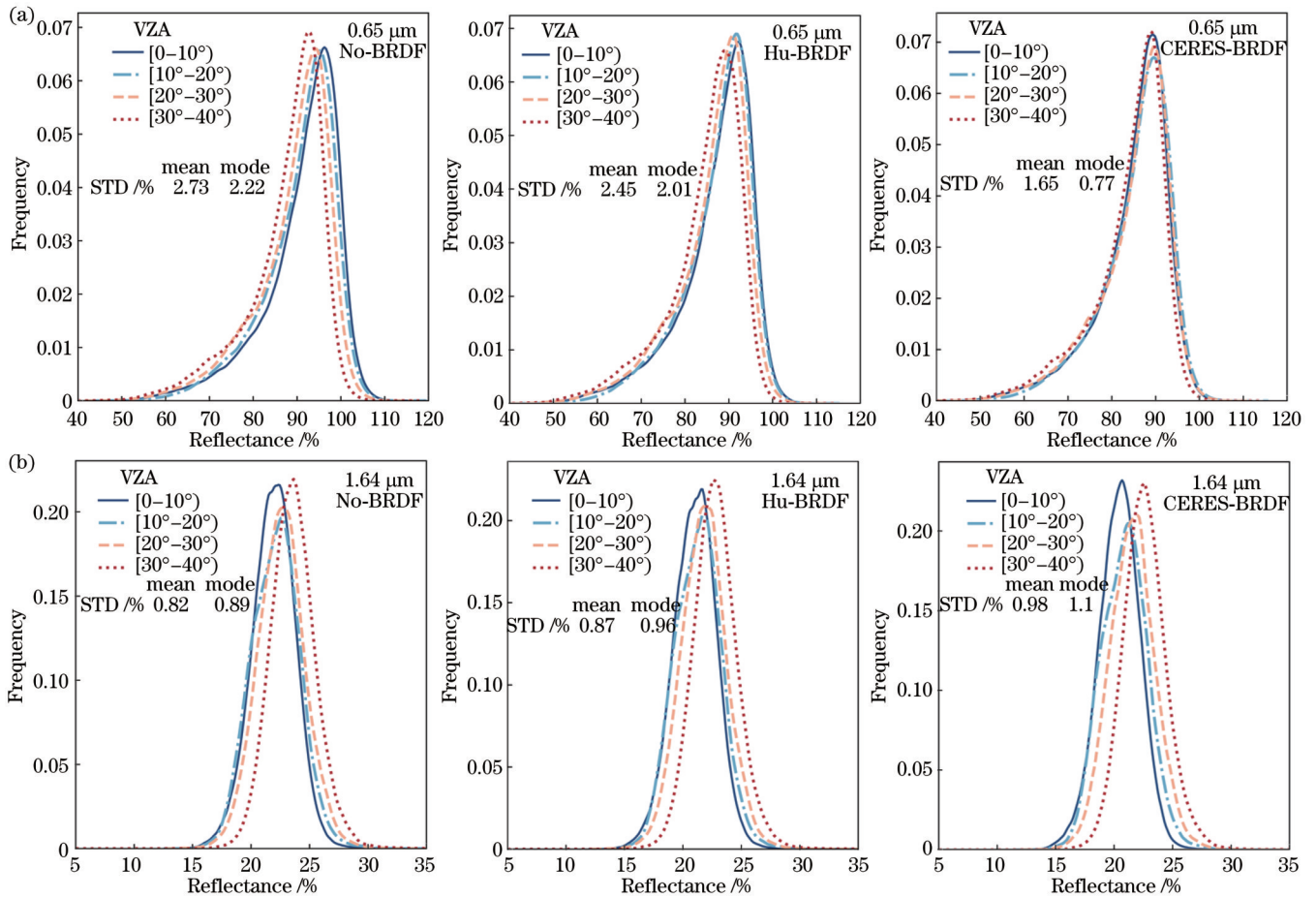


图 2 不同 VZA 角度区间的 DCC 反射率 PDF 曲线。(a) $0.65 \mu\text{m}$; (b) $1.64 \mu\text{m}$

Fig. 2 DCC reflectance PDF curves for different VZA angle intervals. (a) $0.65 \mu\text{m}$; (b) $1.64 \mu\text{m}$

通过分析图 2 和表 2 可以得出以下结论: 1) 在 VIS/NIR 和 SWIR 波段, DCC 均具有较好的朗伯性, 即使不通过 BRDF 模型进行校正, 4 个 VZA 角度区间的反射率 PDF 均值和众数的标准偏差都小于 2.8%; 2) 在 VIS 波段, 经过 CERES 厚冰云模型校正后, 4 个 VZA 角度区间对应的反射率 PDF 曲线几乎重合。这表明对于 MERSI-II 传感器, CERES 厚冰云模型比 Hu 模型具有更好的校正效果; 3) 对于 SWIR 波段, Hu 模型和 CERES 厚冰云模型校正后, 4 个 VZA 角度区间

的反射率 PDF 均值和众数的标准偏差都没有明显降低, 表明这两种 BRDF 模型不适用于 SWIR 波段; 4) 在 VIS/NIR 波段, 不同 VZA 角度区间的反射率 PDF 众数的标准偏差小于均值的标准偏差, 而在 SWIR 波段, 均值的标准偏差小于众数的标准偏差, 这表明在 VIS/NIR 波段月度 DCC 反射率 PDF 众数比均值更为稳定, 而在 SWIR 波段则均值更为稳定。

为了对 Hu 模型和 CERES 厚冰云模型的校正效果进行定量评估, 使用两种模型校正后的月度 DCC 反

表 2 不同 VZA 角度区间的 DCC 反射率 PDF 均值(众数)的标准偏差

Table 2 Standard deviation of PDF reflectance mean (mode) in different VZA angle intervals

Band	Center wavelength / μm	Standard deviation of mean (mode) /%		
		No BRDF	Hu BRDF	CERES BRDF
1	0.470	2.32(1.93)	2.22(1.94)	1.93(0.76)
2	0.550	2.62(2.13)	2.72(2.11)	2.33(0.83)
3	0.650	2.73(2.22)	2.45(2.01)	1.65(0.77)
4	0.865	1.63(1.58)	1.53(1.42)	1.66(0.73)
5	1.380	0.83(1.08)	1.13(1.28)	1.16(1.33)
6	1.640	0.82(0.89)	0.87(0.96)	0.98(1.10)
7	2.130	0.76(0.88)	1.26(1.36)	1.08(1.21)
16	0.905	1.44(1.28)	1.43(1.12)	1.41(0.53)
17	0.936	1.53(1.28)	1.58(1.17)	1.66(0.73)
18	0.940	1.22(1.08)	1.37(1.04)	1.66(0.67)
19	1.030	1.47(1.13)	1.33(1.02)	1.67(0.74)

射率数据,对 FY-3D/MERSI-II 自 2018 年 1 月至 2022 年 12 月期间的辐射响应情况进行了监测。选取了两个典型通道:VIS 波段 0.65 μm 通道和 SWIR 波段 1.64 μm 通道,图 3 展示了这两个通道归一化后的月度 DCC 反射率 PDF 众数(0.65 μm)或均值(1.64 μm)的变化曲线,不同颜色分别代表未经过 BRDF 模型校正、经过 Hu 模型校正和经过 CERES 厚冰云模型校正后的结果。用这 5 年时间序列的月度 DCC 反射率的相对标准差(RSD)和波动性指标来定量评估每种结果。

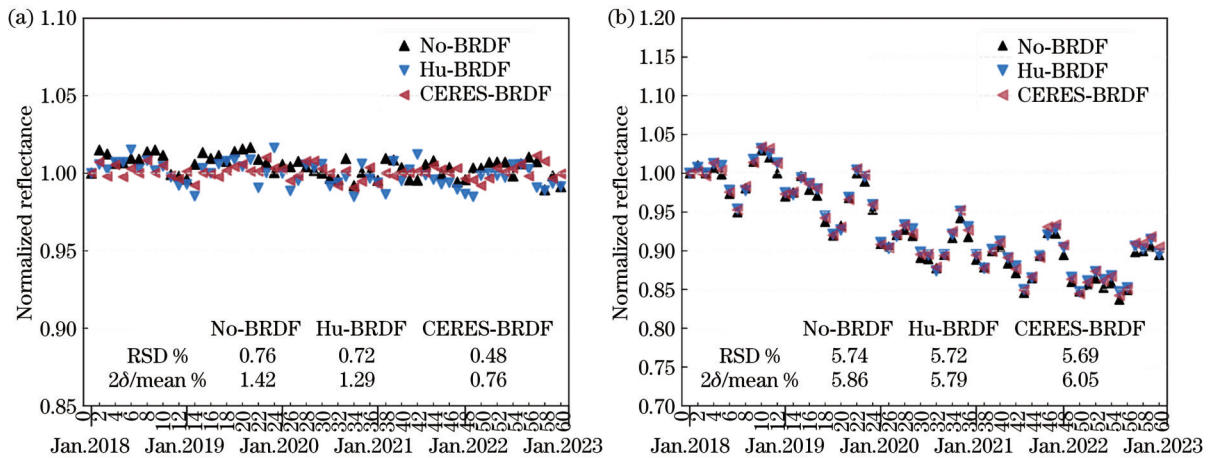


图 3 2018—2022 年, BRDF 模型校正后的归一化月度 DCC 反射率。(a) 0.65 μm ; (b) 1.64 μm

Fig. 3 Normalized monthly DCC reflectance corrected by BRDF models from 2018 to 2022. (a) 0.65 μm ; (b) 1.64 μm

图 4 展示的结果表明, DCC 的地理分布区域随着太阳季节性的迁移而变化, 在各年度相同的月份具有较高的一致性, 而一年中不同月份之间的分布则有明显的差异。每年 4 月份, DCC 均匀分布在赤道南北纬 20° 之间, 集中出现区域为西太平洋、非洲大陆和南美洲大陆。随着太阳相对位置的移动, DCC 在每年 7 月

波动性指标定义为 $2\delta/\text{mean}$, 其中, δ 为 DCC 反射率拟合残差的标准差, mean 为反射率拟合值的平均值。波动性指标越小, 表示反射率的离散程度越低, 方法的稳定性就越高。在 VIS/NIR 波段, CERES 厚冰云模型校正后 DCC 反射率 RSD 降低了约 15%~40%, 波动性指标降低了约 10%~30%, 明显优于 Hu 模型的校正效果。而对于 SWIR 波段, 这两种 BRDF 模型校正后的反射率几乎与校正前的原值重合, RSD 和波动性指标都没有明显下降, 表明这两种 BRDF 模型在 SWIR 波段无效。

综上所述, 对于 FY-3D/MERSI-II 传感器, 在 VIS/NIR 波段选择 DCC 反射率 PDF 众数并采用 CERES 厚冰云 BRDF 模型校正, 在 SWIR 波段选择 DCC 反射率 PDF 均值是 DCC 定标方法的最优方案。值得注意的是, 图 3 展示的 SWIR 波段 1.64 μm 通道反射率具有明显的周期性变化特征, 这可能与 DCC 的季节性变化密切相关。因此, 需要进一步研究 DCC 的季节性特征和去季节性方法来提高 DCC 定标方法在 SWIR 波段的可靠性, 弥补两种常用 BRDF 模型对于 SWIR 波段没有校正效果的不足。

3.3 季节性特征

与沙漠、冰川、湖泊等地球表面固定目标不同, DCC 的位置并不是固定不变的。随着太阳相对位置的变化, 其地理空间分布也会发生变化。图 4 分别展示了 2020—2022 年, 每年 4 月、7 月纬度小于 20° 的热带地区 DCC 地理分布情况, 图中色带表示 DCC 像元出现的次数。

整体向赤道以北转移, 北半球像元数平均占比约为 78%。并且, DCC 在非洲和南美洲的出现频次显著减少, 约 82% 的 DCC 像元集中出现在西太平洋和印度洋区域。Doelling 等^[25]的研究结果表明, 不同地理区域和地表海洋/陆地条件下的 DCC 反射率存在差异, 最低的 DCC 反射率始终出现在西太平洋和印度洋上

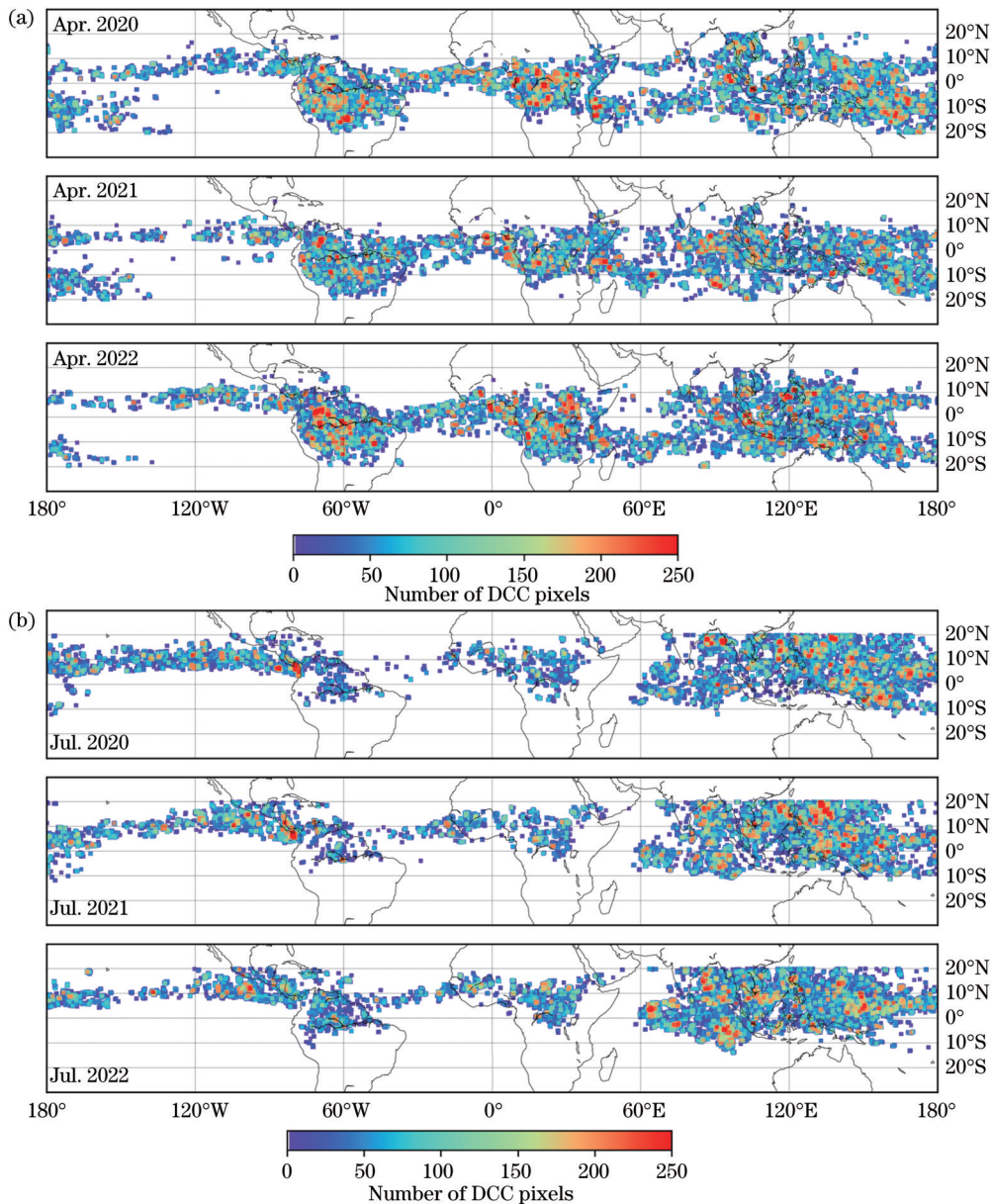


图4 2020—2022年,DCC月度地理分布。(a)每年4月;(b)每年7月

Fig. 4 Geographical distribution of monthly DCC from 2020 to 2022. (a) Every April; (b) every July

空。并且,对于太阳同步轨道卫星,DCC像元对应的太阳和观测角度分布每年都会呈现周期性重复。

图3展示了DCC反射率在SWIR波段具有更为显著的季节性周期变化规律。这种变化可能与DCC的地理分布、云微物理特征、光学厚度和粒子光谱吸收特性有关。图5展示了2018—2022年,1.64 μm和2.13 μm通道月度DCC反射率在这5年时间序列中每年的变化趋势。图中的实线分别表示每年的月度DCC反射率值,而虚线则表示每年相同月份DCC反射率的平均值。分析图5可以得出以下结论:1)由于SWIR波段辐射响应的衰减,1.64 μm和2.13 μm通道的DCC反射率逐年降低;2)从曲线疏密程度上可以看出,1.64 μm通道的衰减程度大于2.13 μm通道;3)每年的月度DCC反射率变化趋势相似,谷值出现在

2月和7月,峰值则出现在4月和10月,以自然年为周期循环重复。VIS/NIR波段月反射率的年度平均变化范围约为1.5%,而SWIR波段反射率对于季节的敏感性更高,其平均变化范围约为6.4%。

3.4 去季节性方法

通过分析DCC季节性特征可以发现,月度DCC反射率呈现以自然年为周期的季节性变化,特别是在SWIR波段,月度DCC反射率季节性波动尤为明显。而这种季节性波动会对DCC定标结果的精度和稳定性产生影响。因此,需要进一步优化DCC定标方法,对DCC反射率进行适当的去季节性处理,减弱DCC反射率季节性波动的影响,弥补两种常用BRDF模型不适用于SWIR波段的不足。

尝试通过简单地对特定月份所在年度的DCC反

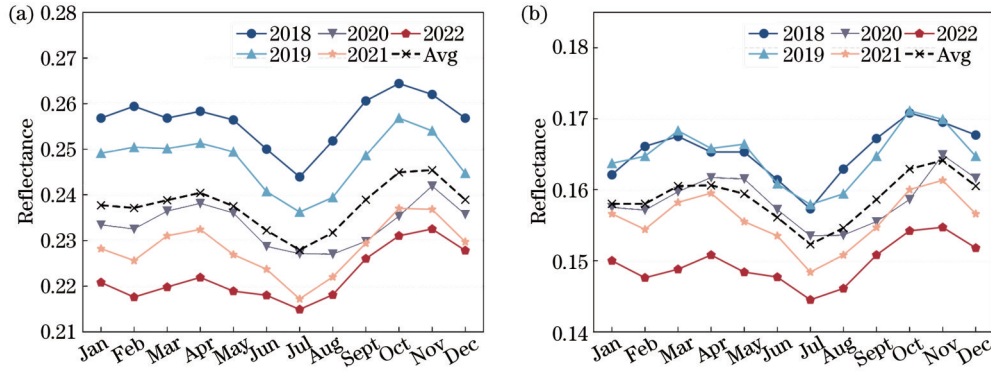


图 5 2018—2022 年, 月度 DCC 反射率年度变化曲线。(a) 1.64 μm; (b) 2.13 μm

Fig. 5 Annual variation curves of DCC monthly reflectance from 2018 to 2022. (a) 1.64 μm; (b) 2.13 μm

射率求平均值, 再从实际观测值中减去该平均值的方
式进行去季节性处理, 但是图 3 展示的月度 DCC 反
射率变化趋势表明, 在 SWIR 波段约有 15% 的辐射响应
总衰减率, 这种方法不能避免仪器辐射响应衰减造成
的影响。因此, 去季节性方法的关键是引入月度 DCC
反射率的拟合残差值以补偿仪器辐射响应衰减量, 再
根据 DCC 反射率的年度周期性变化规律, 分通道分别
计算出每个月的 DCC 反射率季节性校正因子 (SCF),
最后用实际观测值除以对应月份的季节性校正因子得
到校正后的月度 DCC 反射率。具体步骤是: 1) 用最
小二乘法拟合月度 DCC 反射率和月度时间序列, 得到
月度反射率的线性拟合值; 再根据拟合值计算出月度
反射率的衰减量, 该衰减量定义为反射率拟合残差值;
最后将反射率拟合残差值加上反射率实际观测值, 得
到补偿仪器衰减后的 DCC 月度反射率。这一步处理
的目的是消除仪器衰减趋势的影响, 同时保留月度 DCC
反射率的周期性变化特征。2) 计算以每个月为中
心的相邻 12 个月 DCC 反射率的滑动平均值, 增强该
方法的稳健性, 避免个别异常值对结果的影响。3) 每
个月的 DCC 反射率相对值等于补偿仪器衰减后的该月
DCC 反射率值除以 12 个月滑动平均值, 反射率相对
值表征了该月反射率的波动程度。4) 每个月的季节
性校正因子 (SCF) 等于各年中该月反射率相对值的
平均值。经过上述方法得到特定月份的 SCF 为

$$F_{SCF,i} = \frac{1}{n} \sum \frac{R_{TOA,i} + \widehat{R}_i}{\overline{R}_i}, \quad (4)$$

式中: $F_{SCF,i}$ 表示第 i 通道的季节性校正因子; $R_{TOA,i}$ 表
示第 i 通道表观反射率即实际观测值; \widehat{R}_i 表示第 i 通道
反射率拟合残差值; \overline{R}_i 表示相邻 12 个月的反射率滑
动平均值; n 表示以年为单位的反射率时间序列长度, 本
研究中 $n=5$ 。最终, 经过去季节性方法校正后的月度
DCC 反射率值表示为

$$R_{DES,i} = \frac{R_{TOA,i}}{F_{SCF,i}}, \quad (5)$$

式中 $R_{DES,i}$ 表示第 i 通道经过去季节性校正后的 DCC
反射率。图 6 展示了使用上述方法计算出的 MERSI-

II 中 11 个反射太阳通道的 DCC 季节性校正因子。结
果表明, 季节性校正因子的波动程度与 DCC 反射率的
季节性波动程度呈正相关关系。在 VIS/NIR 波段, 季
节性校正因子的变化范围在阴影区域即 2% 以内, 而
SWIR 波段的变化范围增大到约 7%, 表明 DCC 反射
率在 SWIR 波段具有更显著的季节性周期和敏感性。
这与 3.3 节得出的结论相一致, 说明季节性校正因子
可以真实地反映 DCC 反射率的波动程度。

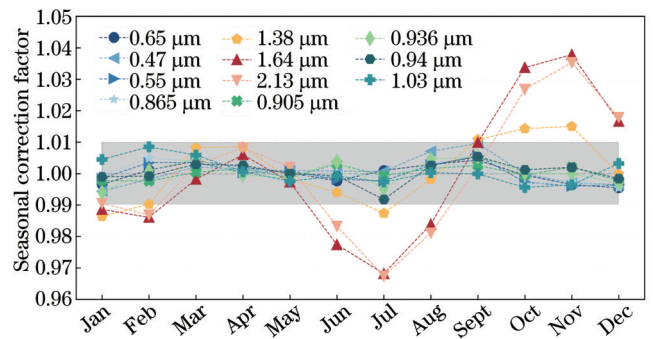


图 6 DCC 季节性校正因子

Fig. 6 Seasonal correction factor of DCC

本文选取了 4 个典型通道验证去季节性方法的实
际效果。图 7 分别展示了 VIS 波段 0.65 μm 通道、NIR
波段 0.865 μm 通道、SWIR 波段 1.64 μm 通道和
2.13 μm 通道经过 BRDF 模型校正和去季节性方法校
正前后的月度 DCC 反射率变化趋势。图中纵坐标为
经过归一化处理的月度 DCC 反射率, 横坐标为 2018—
2022 年月度时间序列, RSD 和 $2\delta/\text{mean}$ 分别为反射率
相对标准差和波动性指标。结果表明: 在 SWIR 波段,
经过去季节性方法校正后, DCC 反射率的波动性有明
显减弱, 阴影区域表示反射率拟合残差波动范围小于
2%。表 3 展示了经过季节性校正后 MERSI-II 反射太
阳波段 DCC 反射率 RSD 和波动性指标下降比率的结果
统计。经过去季节性方法校正后, SWIR 波段
1.38 μm、1.64 μm 和 2.13 μm 三个通道的反射率 RSD
分别降低了约 22.4%、22.0% 和 23.9%, 波动性指标
分别降低了约 52.7%、51.2% 和 54.5%, 证明了该方

法对于 SWIR 波段的有效性。对于 VIS/NIR 波段,反射率 RSD 和波动性指标分别下降了约 10%~30% 和

25%~40%,证明了该方法在 VIS/NIR 波段的适用性。

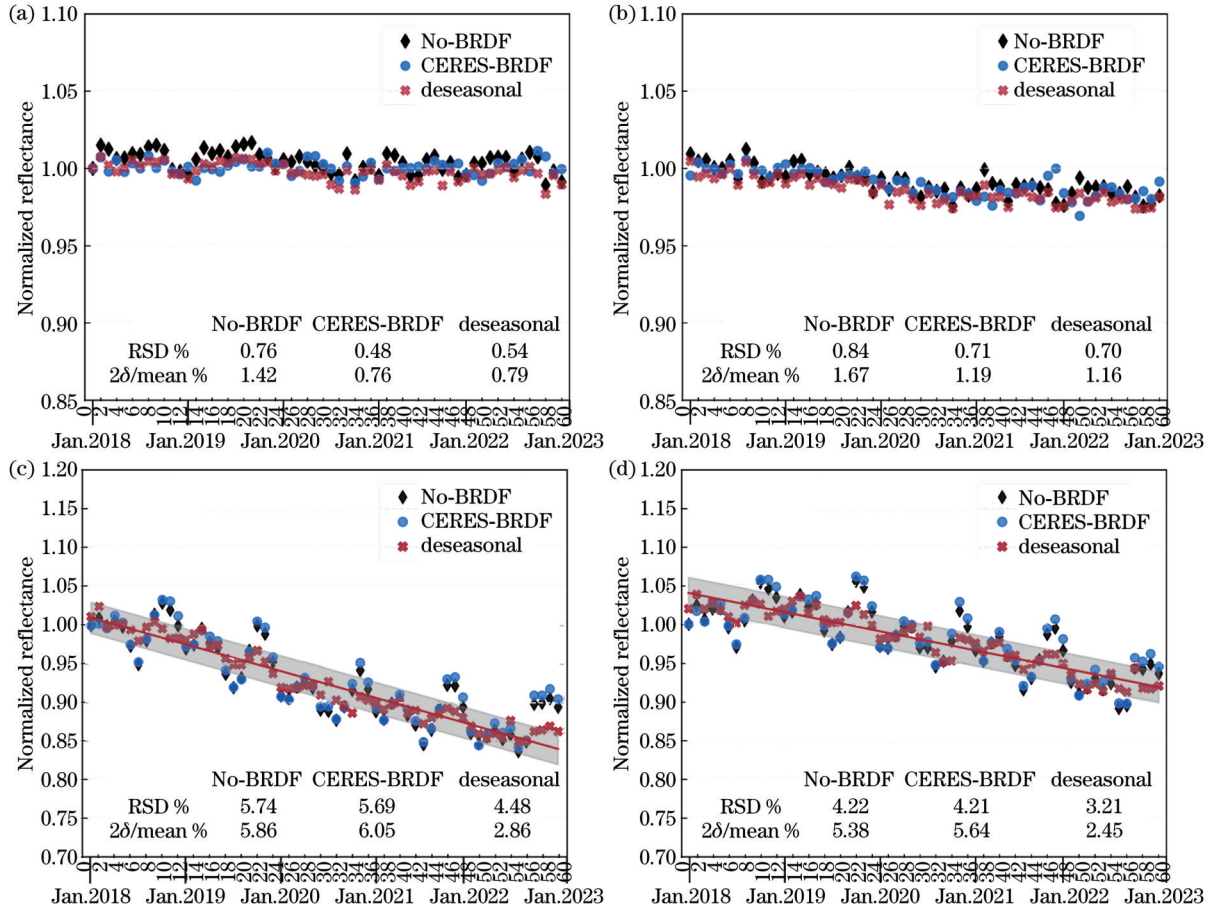


图 7 去季节性方法和 BRDF 模型校正结果对比。(a) 0.65 μm; (b) 0.865 μm; (c) 1.64 μm; (d) 2.13 μm

Fig. 7 Comparison of deseasonalization and BRDF correction results. (a) 0.65 μm; (b) 0.865 μm; (c) 1.64 μm; (d) 2.13 μm

表 3 去季节性方法校正后各通道 DCC 反射率 RSD 和波动性的下降率

Table 3 Decline rates of DCC reflectance RSD and fluctuation in each channel after deseasonal correction

Spectral band / μm	Decline rate of RSD / %	Decline rate of 2δ/mean / %
0.470	10.3	29.9
0.550	9.6	27.3
0.650	28.9	44.3
0.865	16.7	30.5
1.380	22.4	52.7
1.640	22.0	51.2
2.130	23.9	54.5
0.905	17.6	33.5
0.936	18.3	35.6
0.940	18.1	32.4
1.030	20.4	42.8

综上所述,用去季节性方法处理月度 DCC 反射率可以减弱其波动峰值,平滑趋势曲线,得到更为稳定可靠的反射率序列和定标结果。对于存在明显变化趋势

的反射率时间序列,这种去季节性方法更具科学性。应用该去季节性方法有效地降低了 SWIR 波段的月度 DCC 反射率相对标准差和波动性,弥补了常用的 Hu 和 CERES 厚冰云 BRDF 校正模型对 SWIR 波段无效的不足。

4 结果和讨论

本文使用优化后的 DCC 定标方法,对 FY-3D/MERSI-II 仪器中 11 个反射太阳通道(其余反射通道饱和)的辐射响应衰减情况进行定量评估。总结了研究区域、数据和方法(表 4),其中包括:光谱通道、数据时段、经纬度条件、太阳和观测天顶角条件、IR 通道亮温和 VIS 反射率均一性阈值。在 VIS/NIR 波段选择月度反射率 PDF 众数和 CERES 厚冰云 BRDF 模型进行各向异性校正,在 SWIR 波段选择月度反射率 PDF 均值和去季节性方法校正 DCC 的季节性波动。

图 8(a)~(c)分别展示了 2018—2022 年长时间序列 FY-3D/MERSI-II 可见光、近红外和短波红外通道归一化后的月度 DCC 反射率变化趋势。图中,横坐标

表 4 研究区域、数据和方法总结

Table 4 Summary of the research area, data, and methods

Condition	Parameter
Spectral bands	B1-B7, B16-19
Data time	2018—2022
Longitude / (°)	-180+180
Latitude / (°)	-20+20
SZA, VZA / (°)	≤40
IR-BT threshold /K	≤205
IR-BT uniformity threshold /K	≤1
VIS uniformity threshold /%	≤3
Reflectance	Monthly PDF mode (VIS/NIR), mean (SWIR)
Reflectance correction	CERES ice cloud BRDF (VIS/NIR), deseasonal (SWIR)

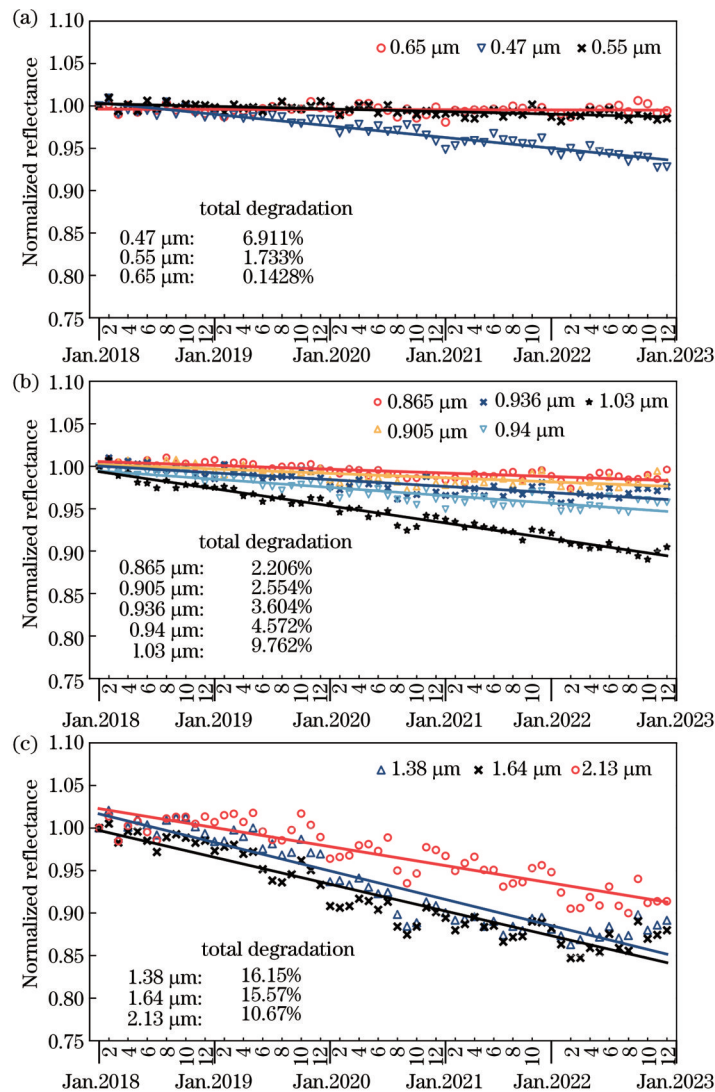


图 8 2018—2022 年, FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段月度 DCC 归一化反射率及线性拟合值。(a) VIS 波段; (b) NIR 波段; (c) SWIR 波段

Fig. 8 Normalized monthly DCC reflectance and linear fitting of FY-3D/MERSI-II in RSB from 2018 to 2022. (a) VIS bands; (b) NIR bands; (c) SWIR bands

表示月份, 纵坐标表示归一化到第一个月的 DCC 反射率值, 虚线表示用最小二乘法拟合的月度 DCC 反射率线性拟合值。

本文使用月度 DCC 反射率的线性拟合值定量评估仪器辐射响应衰减率。2018—2022 年总衰减率和年平均衰减率分别为

$$D_{\text{total},i} = \frac{\hat{R}_{\text{TOA},i}(m_1) - \hat{R}_{\text{TOA},i}(m_n)}{\hat{R}_{\text{TOA},i}(m_n)} \times 100\%, \quad (6)$$

$$D_{\text{annual},i} = \frac{D_{\text{total}}}{m_1 - m_n} \times 12 \times 100\%, \quad (7)$$

式中： i 表示 FY-3D/MERSI-II 第 i 通道； $D_{\text{total},i}$ 表示总衰减率； $D_{\text{annual},i}$ 表示年平均衰减率； m_1 表示数据时间序列的第一个月； m_n 表示最后一个月； $\hat{R}_{\text{TOA},i}(m_1)$ 表示第一个月的 DCC 反射率线性拟合值； $\hat{R}_{\text{TOA},i}(m_n)$ 表示最后一个月的 DCC 反射率线性拟合值。波动性指标 σ 表征了反射率观测值与线性拟合值之间的离散程度， σ 的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m_i=1}^n \left\{ \frac{R(m_i) - \hat{R}(m_i)}{\hat{R}(m_i) - [R(m_i) - \hat{R}(m_i)] / \hat{R}(m_i)} \right\}^2}, \quad (8)$$

表 5 2018—2022 年, FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应衰减评估结果

Table 5 Results of FY-3D/MERSI-II reflected solar bands radiation response degradation from 2018 to 2022

Band	Central wavelength / μm	Reflectance mean	Total degradation rate / %	Annual degradation rate / %	σ / %
1	0.470	0.8999	6.9110	1.3820	1.1740
2	0.550	0.8853	1.7330	0.3466	0.9643
3	0.650	0.8957	0.1428	0.0286	0.9640
4	0.865	0.9178	2.2060	0.4412	1.0640
5	1.380	0.5023	16.1500	3.2310	4.0120
6	1.640	0.2248	15.5700	3.1140	3.5650
7	2.130	0.1501	10.6700	2.1340	3.1670
16	0.905	0.8617	2.5540	0.5108	1.7270
17	0.936	0.7571	3.6040	0.7208	2.5310
18	0.940	0.8424	4.5720	0.9144	2.9850
19	1.030	0.8223	9.7620	1.9520	1.1910

近红外波段中的三个水汽吸收通道(0.9~1 μm)的总衰减率在 2.5%~5% 之间, 年衰减率在 0.5%~1% 之间, 并且呈现出衰减率随波长增加而变大的规律。DCC 位于大气层顶部, 在近红外波段中其光谱几乎不受水汽吸收的影响, 研究结果表明, FY-3D/MERSI-II 水汽吸收波段的 DCC 反射率波动性指标均小于 3%, 这是采用场地(沙漠、冰川等)替代定标方法难以达到的稳定性效果^[11,14,17], 证实了 DCC 定标方法在大气吸收波段的独特优势。而 0.865 μm 通道的稳定性在可见光和水汽吸收波段之间, 年衰减率为 0.4412%。1.03 μm 通道年衰减率约为 2%, 其波动性指标为 1.191%, 是近红外波段中反射率波动最小的通道。

短波红外波段辐射响应衰减最为显著, 年衰减率均大于 2%, 其中 1.38 μm 通道年衰减率达到 3.231%, 是辐射响应衰减最大的通道。此外, 虽然去季节性校正方法已经降低了其波动性指标约 52.7%

式中： m_i 表示某个月； $R(m_i)$ 表示该月的 DCC 反射率； $\hat{R}(m_i)$ 表示该月 DCC 反射率的线性拟合值, 波动性指标反映了 DCC 反射率偏离线性拟合值的程度, 波动性指标越大则仪器辐射响应就越不稳定^[14]。表 5 总结了 2018—2022 年, FY-3D/MERSI-II 中 11 个反射太阳波段的总衰减率、年衰减率、波动性指标(σ)以及 DCC 反射率平均值。

根据图 8 和表 5 可知, FY-3D/MERSI-II 可见光波段中 0.55 μm 通道和 0.65 μm 通道的辐射响应平稳。0.55 μm 通道年衰减率为 0.3466%, 而 0.65 μm 通道 5 年总衰减率为 0.1428%, 年平均衰减率仅为 0.0286%, 波动性指标 $\sigma=0.9640\%$, 是所有反射太阳波段中辐射响应最为稳定的通道。相比之下, 0.47 μm 蓝光通道的总衰减率达到了 6.911%, 年衰减率为 1.382%, 反射率 RSD 和波动性指标都高于可见光波段的均值, 辐射响应衰减明显。

(表 3), 但该波段仍然是反射率波动最为明显的通道, 图 8(c) 直观地展现了这一结论。去季节性方法显著地减弱了 1.64 μm 通道和 2.13 μm 通道 DCC 反射率的波动性, 平滑了反射率变化趋势曲线, 这两个通道都有明显的衰减趋势, 年衰减率分别为 3.114% 和 2.134%。

5 结 论

为了提高基于深对流云目标的 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应评估的精度和稳定性, 本文研究了 Hu 和 CERES 厚冰云两种 BRDF 模型对于 DCC 反射率各向异性的校正效果。在 VIS/NIR 波段, CERES 厚冰云模型的校正效果更好, 反射率的 RSD 降低了约 15%~40%, 波动性降低了约 10%~30%; 在 SWIR 波段, 这两种 BRDF 模型均无明显校正效果。对于 VIS/NIR 波段选择月度 DCC 反射率 PDF 众数比均值更为稳定, 而在 SWIR 波段均值更稳定。

通过分析 DCC 全球空间分布规律发现: DCC 的分布区域季节性南北迁移, 各年中的相同月份具有较高的相似性, 而每年中不同月份的分布又有明显差异。月度 DCC 反射率变化趋势以自然年为周期循环重复, VIS/NIR 和 SWIR 波段月度 DCC 反射率的年变化范围分别约为 1.5% 和 6.4%, SWIR 波段具有更高的季节敏感性。本研究提出的去季节性方法在 SWIR 波段起到了显著效果。1.38 μm 、1.64 μm 和 2.13 μm 通道经过去季节性方法校正后, 反射率 RSD 分别降低了约 22.4%、22.0% 和 23.9%, 波动性分别降低了约 52.9%、51.2% 和 54.5%, 弥补了 BRDF 模型在 SWIR 波段无效的不足。

使用优化后的 DCC 定标方法定量评估了 2018—2022 年长时间序列的 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应衰减情况。VIS 波段中 0.65 μm 通道年平均衰减率仅为 0.0286%, 是辐射响应最为稳定的通道。0.47 μm 蓝光通道的年衰减率大于 1.3%, 辐射响应衰减明显。NIR 波段中三个水汽吸收通道年衰减率在 0.5%~1% 之间, 呈现出衰减率随波长增加的规律, 并且波动性指标都小于 3%, 证明了 DCC 定标跟踪方法在水汽吸收通道的优越性。SWIR 波段衰减最为显著, 其中 1.38 μm 衰减最大并且波动性也最强。1.64 μm 和 2.13 μm 通道的年衰减率分别为 3.114% 和 2.134%, 本文提出的去季节性方法显著地减弱了这两个通道 DCC 反射率的波动性。

综上所述, 本文优化了 DCC 定标方法中关键变量的选择, 分析了 DCC 季节性特征并提出了一种去季节性方法, 弥补了 Hu 和 CERES 厚冰云 BRDF 模型在 SWIR 波段无效的不足。这种去季节性方法不仅适用于 FY-3D/MERSI-II, 对于其他卫星光学遥感器定标跟踪也具有参考价值。本文使用优化后的 DCC 定标方法, 获取了 2018—2022 年 FY-3D/MERSI-II 反射太阳波段辐射响应的定量衰减结果, 该结果为 FY-3D/MERSI-II 业务定标更新提供了重要的参考依据。

参 考 文 献

- [1] 朱爱军, 胡秀清, 林曼筠, 等. 风云三号 D 气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 1-10.
Zhu A J, Hu X Q, Lin M Y, et al. Global data acquisition methods and data distribution for FY-3D meteorological satellite[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(3): 1-10.
- [2] 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. FY-3C MERSI 太阳反射波段的交叉定标[J]. 光学精密工程, 2020, 28(7): 1462-1470.
He X W, Feng X H, Han Q, et al. Cross-calibration of FY-3C medium resolution spectral imager in reflective bands[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(7): 1462-1470.
- [3] Upreti 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] 朱思峰, 伽丽丽, 许华, 等. DPC/GaoFen-5 与 MODIS/Aqua 在轨交叉辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1828008.
Zhu S F, Qie L L, Xu H, et al. In-flight cross radiometric calibration of DPC/GaoFen-5 and MODIS/aqua[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1828008.
- [5] Hu X Q, Liu J J, Sun L, et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 566-582.
- [6] Cao C Y, Xiong J, Blonski S, et al. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(20): 11664-11678.
- [7] Bhatt R, Doelling D, Wu A S, et al. Initial stability assessment of S-NPP VIIRS reflective solar band calibration using invariant desert and deep convective cloud targets[J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 2809-2826.
- [8] 徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228001.
Xu N, Wu R H, Hu X Q, et al. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
- [9] Upreti S, Cao C Y, Blonski S, et al. Evaluating radiometric consistency between Suomi NPP VIIRS and NOAA-19 AVHRR using extended simultaneous nadir overpass in the low latitudes[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8866: 88660L.
- [10] Cao C Y, Bai Y, Wang W H, et al. Radiometric inter-consistency of VIIRS DNB on Suomi NPP and NOAA-20 from observations of reflected lunar lights over deep convective clouds[J]. Remote Sensing, 2019, 11(8): 934.
- [11] 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.
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.
- [12] Sohn B J, Ham S H, Yang P. Possibility of the visible-channel calibration using deep convective clouds overshooting the TTL[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(11): 2271-2283.
- [13] Chen L, Hu X Q, Xu N, et al. The application of deep convective clouds in the calibration and response monitoring of the reflective solar bands of FY-3A/MERSI (medium resolution spectral imager)[J]. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6958-6975.
- [14] 陈林, 徐娜, 胡秀清, 等. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2639-2645.
Chen L, Xu N, Hu X Q, et al. Study on orbit radiometric calibration for FY-2 visible band based on deep convective cloud[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(8): 2639-2645.
- [15] Wang W H, Cao C Y. Monitoring the NOAA operational VIIRS RSB and DNB calibration stability using monthly and semi-monthly deep convective clouds time series[J]. Remote Sensing, 2016, 8(1): 32.
- [16] Bhatt R, Doelling D, Wu A S, et al. Initial stability assessment of S-NPP VIIRS reflective solar band calibration using invariant desert and deep convective cloud targets[J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 2809-2826.
- [17] Bhatt R, Doelling D R, Scarino B R, et al. Advances in utilizing tropical deep convective clouds as a stable target for on-orbit calibration of satellite imager reflective solar bands[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11127: 111271H.
- [18] Fougne B, Doelling D, Crespin A, et al. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of deep convective clouds (DCC) derived from PARASOL measurements and compared to radiative transfer computation and model[EB/OL]. [2023-03-05]. <https://pdfs.semanticscholar.org/d2a4/5754b504929c2885617ead2d4f64bb3a35a5.pdf>.

- [19] Bhatt R, Doelling D, Scarino B, et al. Development of seasonal BRDF models to extend the use of deep convective clouds as invariant targets for satellite SWIR-band calibration[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1061.
- [20] Wang W H, Cao C Y. Evaluation of NOAA-20 VIIRS reflective solar bands early on-orbit performance using daily deep convective clouds recent improvements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 3975-3985.
- [21] Chang T J, Xiong X X, Mu Q Z. VIIRS reflective solar band radiometric and stability evaluation using deep convective clouds [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7009-7017.
- [22] Sterckx S, Livens S, RayleighAdriaensen S., deep convective clouds, and cross-sensor desert vicarious calibration validation for the PROBA-V mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1437-1452.
- [23] Gong X Y, Li Z L, Li J, et al. Monitoring the VIIRS sensor data records reflective solar band calibrations using DCC with collocated CrIS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(15): 8688-8706.
- [24] Hu Y X, Wielicki B A, Yang P, et al. Application of deep convective cloud albedo observation to satellite-based study of the terrestrial atmosphere: monitoring the stability of spaceborne measurements and assessing absorption anomaly[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2594-2599.
- [25] Doelling D R, Morstad D, Scarino B R, et al. The characterization of deep convective clouds as an invariant calibration target and as a visible calibration technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1147-1159.
- [26] Wang W H, Cao C Y, Shao X, et al. Evaluation of 10-year NOAA/NASA Suomi NPP and NOAA-20 VIIRS reflective solar band (RSB) sensor data records (SDR) over deep convective clouds[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3566.
- [27] Wang W H, Cao C Y. DCC radiometric sensitivity to spatial resolution, cluster size, and LWIR calibration bias based on VIIRS observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(1): 48-60.
- [28] 孙凌, 胡秀清, 郭茂华, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段的多场地定标跟踪[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 84-96.
- Sun L, Hu X Q, Guo M H, et al. Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 84-96.
- [29] 杨敏, 刘照言, 赵永光, 等. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1828001.
- Yang M, Liu Z Y, Zhao Y G, et al. On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1828001.
- [30] 左丰华, 胡秀清, 王霞, 等. FY-3E 同平台成像仪对 HIRAS-II 定位与定标精度评估[J]. *光学学报*, 2022, 42(24): 2430002.
- Zuo F H, Hu X Q, Wang X, et al. Accuracy evaluation of positioning and calibration of HIRAS-II by FY-3E imager on the same platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2430002.
- [31] 包诗薇, 陈洪耀, 张黎明, 等. 光学遥感器复杂环境下在轨辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0628001.
- Bao S W, Chen H Y, Zhang L M, et al. On-orbit radiometric calibration method of optical remote sensor in complex environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0628001.

Radiometric Response Evaluation of FY-3D/MERSI-II Reflective Solar Bands Based on Deep Convective Cloud

Zhang Bei^{1,2}, Hu Xiuqing^{1,2*}, Zhou Weiwei³, Wang Ling^{1,2}, Chen Lin^{1,2}, Zhang Peng^{1,2}

¹National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

²Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

³School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China

Abstract

Objective The FY-3D medium resolution spectral imager (MERSI-II) has been in orbit for more than five years. Quantitative application inversion shows that the radiometric response of some channels has deteriorated significantly, seriously affecting the accuracy of satellite quantitative remote sensing products. Therefore, it is necessary to evaluate the radiometric response of the MERSI-II and update the operation calibration according to the evaluation results. Compared with traditional targets such as deserts and glaciers, deep convective cloud (DCC) features a higher signal-to-noise ratio, isotropic reflection characteristics close to Lambertian, and minimum water vapor absorption. In-orbit calibration methods based on DCC target are widely employed to monitor the radiation performance of satellite sensors. However, the uncertainty factors in the DCC calibration method will affect the accuracy and stability, such as DCC bidirectional reflectance distribution function (BRDF) correction model, reflectivity probability density function (PDF) eigenvalues, and seasonal fluctuations. In this study, the basic DCC calibration method is optimized. Firstly, the BRDF correction effects of the Hu model and CERES thick ice cloud model are compared, as well as the stability of PDF mode and the mean of

DCC reflectivity. Secondly, a deseasonal method based on reflectivity fitting residual and the moving average is proposed as the BRDF correction model of DDC is invalid in the SWIR band. Finally, the radiation performance of FY-3D/MERSI-II reflected solar bands is quantitatively evaluated by the optimization method. The evaluation results will be adopted as an important basis for the service calibration update of MERSI-II reflected solar bands.

Methods We utilize DCC targets to evaluate the trend of radiometric response changes in most of the MERSI-II reflected solar bands. Firstly, the DCC target pixels are identified according to the infrared 10.8 μm channel brightness temperature threshold, observation geometric conditions (latitude, solar zenith angle, observation zenith angle), and spatial homogeneity conditions. Secondly, the solar zenith angle and earth-sun distance corrections are performed on the identified reflectivity of each DCC pixel to obtain the apparent reflectivity of the DCC. Then, two DCC BRDF models are leveraged to correct the anisotropy of apparent reflectance and compare the correction effects. Thirdly, the monthly DCC reflectivity PDF is constructed. Finally, the radiometric response of the MERSI-II sensor is evaluated by tracking the monthly DCC reflectivity PDF mean or mode sequence. In this section, we investigate the seasonal characteristics of DCC and propose a deseasonal method to reduce the fluctuations of the reflectivity PDF mean or modal sequence.

Results and Discussions For the VIS/NIR bands, the correction effect of the CERES thick ice cloud model is better than the Hu model (Fig. 2), the RSD of the reflectivity is reduced by 15%–40%, and the fluctuations are reduced by about 10%–30% (Fig. 3). However, for the SWIR band, the two BRDF models have no obvious correction effect. For the VIS/NIR band, the monthly DCC reflectivity PDF mode is more stable than the mean, while the mean is more stable in the SWIR band (Table 2). The DDC distribution area migrates from north to south seasonally, and the same month in each year has high similarity, while the distribution of different months in each year is different (Fig. 4). The annual variation range of monthly DCC reflectance in VIS/NIR and SWIR bands is about 1.5% and 6.4% respectively, and SWIR band has higher seasonal sensitivity (Fig. 5). The proposed deseasonal method has yielded significant results in the SWIR band (Fig. 7). The reflectance RSD of 1.38 μm , 1.64 μm , and 2.13 μm channels decreases by about 22.4%, 22.0%, and 23.9% respectively, and the fluctuations decrease by about 52.9%, 51.2%, and 54.5% respectively, which compensates for the inefficiency of the BRDF model in the SWIR band (Table 3). The optimized DCC calibration method is employed to quantitatively evaluate the radiation degradation of the MERSI-II reflected solar bands from 2018 to 2022 (Fig. 8). The annual average degradation rate of 0.65 μm channel is only 0.02826% and the 0.47 μm blue channel is greater than 1.3%. The annual degradation rate of the three water vapor absorption channels in the NIR band is between 0.5% and 1%. This reveals a law that the degradation rate increases with the wavelength, and the fluctuation index is less than 3%, proving the superiority of the DCC calibration method in the water vapor absorption channel. The SWIR band has the most significant degradation, of which 1.38 μm has the largest degradation and the strongest fluctuation. The annual decay rates of 1.64 μm and 2.13 μm channels are 3.114% and 2.134%, respectively (Table 5).

Conclusions We adopt the DCC target to evaluate the radiometric response trend of the MERSI-II reflected solar bands, and optimize the basic DCC calibration method. Firstly, the DCC BRDF correction model and the selection of monthly PDF eigenvalues (mean/mode) are optimized. Secondly, the seasonal characteristics of DCC are investigated, and a deseasonal method based on reflectivity fitting residuals and moving averages is proposed to compensate for the ineffectiveness of Hu and CERES thick ice cloud BRDF models in SWIR bands. This method significantly mitigates the RSD and fluctuations of monthly DCC reflectance in the SWIR band from 2018 to 2022, which are reduced by about 23% and 53%, respectively. This method is not only applicable to MERSI-II but also provides references for the radiometric calibration of other satellite optical remote sensors. Finally, the optimized DCC calibration method is utilized to quantitatively evaluate the attenuation of the radiometric response of the FY-3D/MERSI-II reflected solar bands. The results show that the blue channel and the four SWIR channels have significant degradation.

Key words remote sensing and sensors; radiometric calibration; deep convective cloud; bidirectional reflection distribution function; medium resolution spectral imager