

FY-3B 卫星 MERSI 可见光近红外波段定标精度评估

何兴伟, 韩琦*, 冯小虎, 康宁

中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 FY-3B 中分辨率光谱成像仪(MERSI)不能实现可见光近红外波段的星上绝对定标。为了提高 MERSI 高信噪比窄波段通道的辐射定标精度, 针对国际通用的 6 个北非沙漠目标, 利用高质量的 SeaWiFS 数据构建天顶双向反射分布函数(BRDF)模型, 借助 MODTRAN 辐射传输模型和 ERA-Interim 再分析资料吸收气体数据构建光谱匹配因子, 对 FY-3B MERSI 5 年的在轨运行数据进行交叉定标研究。所构建的天顶反射模型可以准确表达伪不变目标的天顶反射率, 波段预测误差基本都在 3% 之内; 考虑观测几何条件和吸收气体含量的参数化光谱匹配因子可以有效预测 MERSI 的天顶反射率; 交叉定标结果的时间序列十分稳定且无明显趋势, 与伪不变目标的天顶辐射信号长期稳定且规律性变化的特点一致。与 MERSI L1 业务化定标结果相比, 第 8~12 波段的定标结果偏低, 相对偏差小于 0, 而第 13~16 波段的定标结果偏高, 相对偏差大于 0。除了波段 8 以外的其他 8 个波段的偏差基本都在 -5%~5% 以内。波长小于 600 nm 的波段的月平均偏差较大, 特别是三个蓝光波段(第 8~10 波段); 第 13~16 波段的月平均偏差相对稳定, 基本都在 -5%~5% 以内。

关键词 遥感; 中分辨率光谱成像仪; 交叉定标; 光谱匹配因子; 双向反射分布函数

中图分类号 TP732; P414.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1828001

Calibration Accuracy Evaluation of Visible and Near-Infrared Bands of FY-3B MERIS

He Xingwei, Han Qi*, Feng Xiaohu, Kang Ning

National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China

Abstract FY-3B medium resolution imaging spectrometer (MERIS) cannot achieve the absolute calibration for the visible and near-infrared bands. To improve the MERIS absolute calibration accuracy, the six widely used north African desert pseudo-invariant targets are adopted herein, taking the advantage of the high-quality SeaWiFS data to construct the bidirectional reflectance distribution function(BRDF) model and then using the MODTRAN radiative transfer model and ERA-Interim absorption gas reanalysis data to construct the spectral band adjustment factor (SBAF). Lastly, five years of FY-3B MERIS data are used for the cross-calibration. The constructed BRDF model in this study can accurately express the top of atmosphere (TOA) reflectance (ρ^{TOA}) over the pseudo-invariant targets, and the prediction error is basically within 3%. The TOA reflectance of MERIS can be effectively predicted through the parameterized SBAF which considers the observation geometry and absorbed gas content. Cross-calibration results show that the time series are extremely stable and have no obvious trends, which are consistent with the characters of TOA reflectance over pseudo-invariant targets. Compared with the operational calibration results of MERIS L1, the cross-calibration results of bands 8-12 are lower and the bias is less than zero, whereas for bands 13-16, the results are higher and the bias is greater than zero. Except for band 8, the biases of the other eight bands are within -5%~5%. The monthly mean deviation of bands with a wavelength less than 600 nm are larger, particularly the three blue bands (bands 8-10). The monthly mean relative deviations of bands 13-16 are relatively stable, and they are basically within -5%~5%.

Key words remote sensing; medium resolution imaging spectrometer; cross-calibration; spectral band adjustment factor; bidirectional reflectance distribution function

OCIS codes 280.4788; 120.0280

收稿日期: 2020-05-14; 修回日期: 2020-05-22; 录用日期: 2020-06-03

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1507803)

* E-mail: hexingwei@cma.gov.com

1 引 言

风云三号(FY-3)系列卫星是我国第二代极轨气象卫星。FY-3B于2010年11月5日在太原卫星发射中心发射升空,轨道高度为836 km,赤道过境时间为上午10:30。中分辨率光谱成像仪(MERSI)是FY-3B搭载的关键有效载荷之一,可以探测来自地球大气系统的电磁辐射,实现植被、生态、地表覆盖分类等陆表特性的全球遥感监测。FY-3B自发射至今已在轨运行近10年,是我国目前在轨业务运行寿命最长的极轨气象卫星,搭载在其上的MERSI传感器能够对全球气候变化研究提供重要的遥感数据。

然而,发射升空后的卫星会因其自身特性和周围环境的变化而出现传感器老化及灵敏度下降等问题,严重影响它的辐射性能,因此需要对其辐射性能进行有效的在轨监测和订正,从而为数值天气预报、气候变化分析等研究工作提供数据保障^[1-2]。对于具有完备的星上定标系统的传感器(如MODIS、SeaWiFS等),它们的数据质量较高,绝对辐射定标精度分别达到了5%和3%,相对精度分别达到了1%和0.16%^[3]。搭载在NOAA上的AVHRR传感器在可见光近红外波段缺少星上定标系统,通过场地定标获取卫星过境时刻的同步测量数据,就可以监测传感器的性能变化并对其进行订正。尽管MERSI具有可见光星上定标设备,但该定标设备只能用于仪器响应的衰减追踪,因此,必须采用其他定标手段来保证数据的辐射精度^[4]。

Sun等^[5]提出了基于地表双向反射分布函数(BRDF)模型、矢量辐射传输模型6SV并联合MODTRAN吸收透过率校正的MERSI可见光近红外波段替代定标方法;为了提高FY-3A MERSI的在轨定标频次,Hu等^[6]提出了多场地辐射定标跟踪方法;徐娜等^[7]将多种不依赖地面同步实测数据的替代定标方法相结合形成了不同的定标方法,然后基于样本的多等级反射特性,利用这些定标方法实现了MERSI宽动态范围的辐射定标;王玲等^[8]结合MODIS数据及大气辐射传输模型对12种亮度稳定的目标进行了模拟计算,并对FY-3C MERSI在可见光近红外波段的定标精度进行了追踪和评估。

目前,风云三号系列卫星的定标均以敦煌场地替代定标为主。敦煌场地替代定标在星地同步测量时会受各种自然因素(大气条件、天气状况等)和人为因素(观测仪器等)的影响,需要投入大量的人力物力,而且获取的同步测量数据有限;此外,敦煌场

地替代定标每年进行一次,定标频次低,不能有效地检测仪器辐射性能的变化。交叉定标方法就是将定标精度高、数据质量较好的传感器(如SeaWiFS和MODIS)作为参考传感器^[9],对定标精度较低的卫星传感器进行定标,被定标传感器理论上可以达到参考传感器的定标精度;该方法的核心思想就是基于参考传感器,通过光谱匹配和时空匹配来模拟待定标传感器的天顶辐射值。相对于场地替代定标,交叉定标需要的地面测量数据较少,定标精度主要取决于参考传感器的精度以及光谱、时空匹配带来的误差,非常适合用于历史数据的重定标工作。

本文针对国际上通用的6个北非沙漠目标,采用高质量的SeaWiFS数据构建天顶反射模型,并联合MODTRAN辐射传输模型构建光谱匹配因子,对FY-3B MERSI在轨运行期间(2011年1月—2015年12月)的数据进行交叉定标研究,并对其定标精度进行了评估。

2 数 据

2.1 SeaWiFS 数据

SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)是搭载在海洋水色卫星(SeaStar)上的美国第二代太阳同步轨道海色遥感传感器。卫星赤道过境时间为02:00(二十四时制),瞬时视场角为0.09°,扫描镜设置成±20°倾斜观测(为了避免太阳耀斑的影响)。SeaWiFS数据共有8个光谱波段:6个可见光波段和2个近红外波段,主要技术参数见表1。

表1 MERSI和SeaWiFS光谱波段指标

Table 1 Spectral band specifications for MERSI and SeaWiFS

Instrument	Band	Central	Bandwidth /	Spatial
		wavelength / μm	μm	resolution / m
MERSI	8	0.412	0.02	1000
	9	0.443	0.02	1000
	10	0.490	0.02	1000
	11	0.520	0.02	1000
	12	0.565	0.02	1000
	13	0.650	0.02	1000
	14	0.685	0.02	1000
	15	0.765	0.02	1000
SeaWiFS	16	0.865	0.02	1000
	1	0.412	0.02	4000
	2	0.443	0.02	4000
	3	0.490	0.02	4000
	4	0.510	0.02	4000
	5	0.555	0.02	4000
	6	0.670	0.02	4000
	7	0.765	0.04	4000
8	0.865	0.04	4000	

SeaWiFS 有 LAC (Local Area Coverage, 1.1 km)和 GAC(Global Area Coverage, 4 km)两种数据,其中 GAC 提供整个运行周期内全球覆盖范围的数据。为了避免后期 SeaWiFS 数据质量衰减和轨道漂移问题,本文选取 1997—2001 年 GAC (4.5 km)长时间序列数据用于交叉定标研究。

2.2 MERSI

FY-3B 是我国第二代极轨气象卫星的第二颗卫星,MERSI 是其搭载的一个关键光学成像仪器。MERSI 配有 45°扫描镜和消旋 K 镜的跨轨多探元并扫式辐射计,扫描周期为 1.5 s,可对星下点±55°的视场进行对地观测。MERSI 有 20 个光谱通道,其中包括 19 个可见光谱通道和 1 个近红外光谱通道。MERSI 的第 8~16 波段为高信噪比窄波段通道,能够实现水体中叶绿素、悬浮泥沙和可溶黄色物质浓度的定量反演。表 1 为 MERSI 第 8~16 通道和 SeaWiFS 对应通道的波段特性。两传感器波段

设置相似,故可以将 SeaWiFS 作为参考数据源,对 MERSI 的窄波段通道(第 8~16 通道)进行交叉定标研究与评估。

3 方 法

3.1 伪不变目标天顶反射率建模

伪不变目标多指沙漠、极地冰雪等地表反射特性和大气状况长期保持稳定,大气干洁且人类活动较少的地区或者月球等地外目标。本文选用地球观测卫星委员会红外和可见光遥感器定标和验证工作小组(Committee on Earth Observation Satellites-Working Group for Calibration and Validation-subgroup on Infrared Visible Optical Sensors, CEOS WGCV IVOS)评估选定的 6 个北非沙漠目标进行实验,这 6 个伪不变目标(Algeria-3、Algeria-1、Libya-1、Libya-4、Mauritania-1 和 Mauritania-2)的地理分布如图 1 所示。

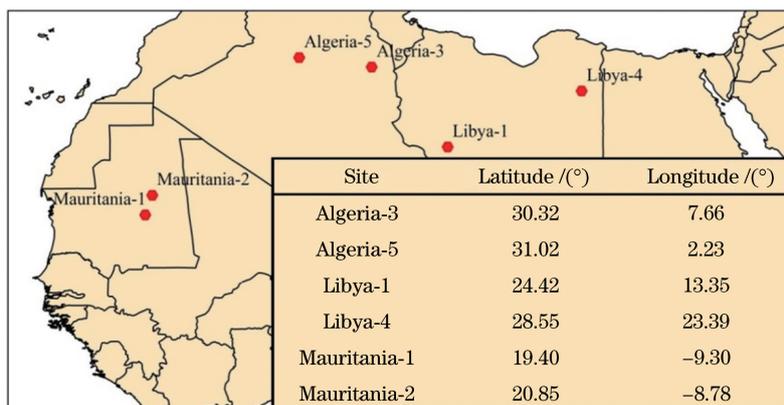


图 1 6 个伪不变目标的地理分布

Fig. 1 Distribution of six pseudo-invariant targets

对于定标精度高的卫星传感器在天顶观测以上选定的伪不变目标,其天顶辐射测量值表现出随时间规律性变化且长时间变化趋势可忽略的特点。因此,本文采用高精度的 SeaWiFS 数据构建各目标在各波段天顶辐射信号的预测模型。

首先对 SeaWiFS 数据进行读取和定标,计算得到 6 个伪不变目标的高精度的天顶反射率(TOA reflectance)。尽管伪不变目标的地表和大气状况都十分稳定,但为了尽可能消除云污染和仪器观测异常等观测因素对构建的天顶反射率模型的影响,还需要通过云掩膜和时空均匀性来挑选无云且均一的像元。

对于北非沙漠目标,本文使用 Ross-Thick Li-Sparse 模型(简称 Ross-Li 模型)来描述各目标在各

波段的天顶反射率。Ross-Li 模型是一种半经验核驱动模型,它用不同的“核”来描述不同地表类型的散射;而 BRDF 则是对这几个核进行线性加权而构成的数学表达式^[10],即

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi) = f_{iso} + f_{vol}K_{vol}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{geo}K_{geo}(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (1)$$

式中: ρ 为双向反射率(这里为天顶反射率); f 为核系数,与波段有关; K_{vol} 和 K_{geo} 分别为体散射核和几何光学核,与角度有关^[11-12];下标 iso、vol、geo 依次代表各向同性、体散射和几何光学; θ_s 、 θ_v 和 φ 分别为太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。通过最小二乘拟合伪不变目标上的 ρ^{TOA} 时间序列,即求取最优的三个核系数使得拟合误差 $\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 达到最小,

$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$ 的表达式为

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [\rho_i^{\text{TOA}} - \rho(\theta_s, \theta_v, \varphi)]^2, \quad (2)$$

式中： ρ_i^{TOA} 为 SeaWiFS 观测值； $\rho(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ 为 BRDF 的模拟值。为了评估模型的预测精度，计算了每个目标上 BRDF 的模拟值和 SeaWiFS 观测值的平均偏差和均方根误差(RMSE)。

1997—2001 年间, Libya-4 目标在 SeaWiFS 各波段下天顶反射率的观测结果 ρ^{TOA} (空心点) 以及对应 BRDF 模型的拟合预测值 ρ^{BRDF} (实心点) 如图 2 所示, 不同的颜色表示不同的波段。可以看出, 由于观测角度(BRDF 效应)和地表、大气情况的变化, ρ^{TOA} 表现为以一年左右为周期的规律性变化。从图 2 中还可以看出, 观测结果和拟合预测值之间的差别十分微小, 即 BRDF 模型可以有效地预测 ρ^{TOA} 的变化, 这也说明 BRDF 效应是导致伪不变目标天顶反射率变化的最主要因素。

图 3 为 Libya-4 目标每个有效观测值对应的 BRDF 模拟误差及其统计因子, 可以看出, 不同

SeaWiFS 波段的 BRDF 模型的拟合误差表现得不尽相同, 各波段拟合的偏差都十分接近 0, BRDF 模型预测偏差的 RMSE 都在 1.2% 以内, 没有明显的离群点。

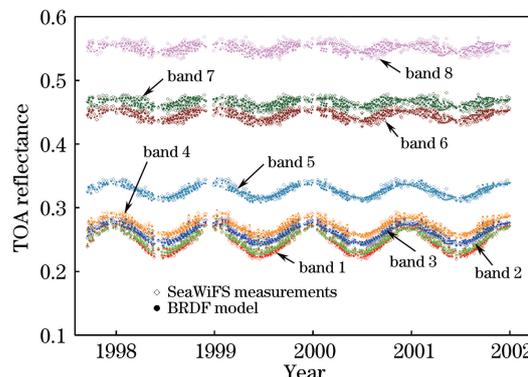


图 2 Libya-4 目标的 SeaWiFS 观测值 ρ^{TOA} 和 BRDF 模型预测值的时间序列

Fig. 2 Time series of TOA reflectance observed by SeaWiFS versus BRDF modeling over Libya-4

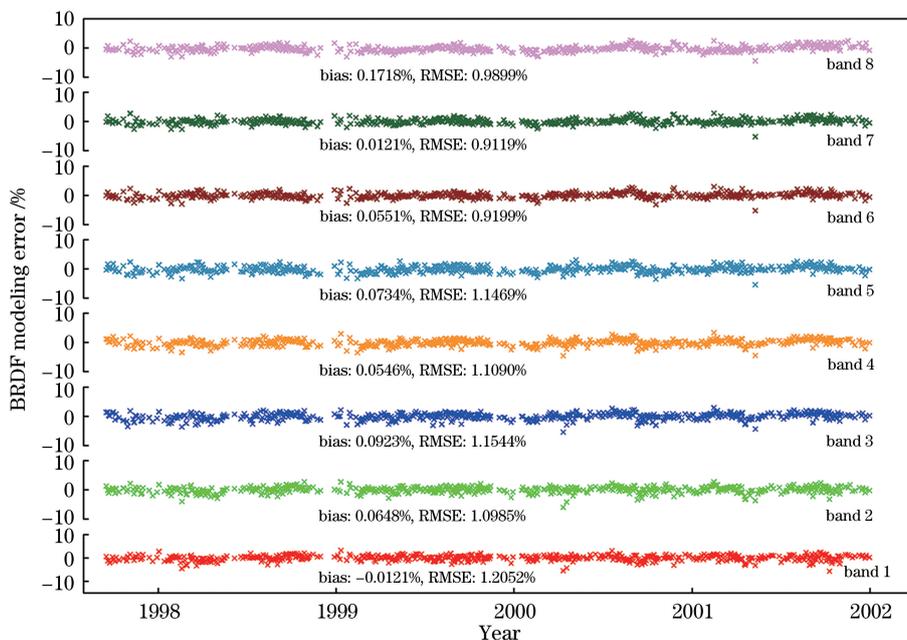


图 3 Libya-4 目标的 BRDF 模拟误差时间序列及其统计因子

Fig. 3 Time series of BRDF modeling errors and statistical factors over Libya-4

表 2 总结了各目标在不同波段下拟合的 RMSE。对于北非沙漠目标, Libya-4 的拟合精度最高, Mauritania-2 的拟合精度最低; 对于不同的波段, 第 6~8 波段的拟合精度都在 1.5% 以内, 第 1~5 波段的拟合精度与第 6~8 波段相比较低, Mauritania-2 在第 3 波段的拟合精度为 3.216%。通过分析可以看出, 基于高质量的 SeaWiFS 数据构

建的天顶反射模型可以准确地模拟伪不变目标的天顶反射率。

3.2 MERSI 参考天顶反射率的计算

在相同的地表、大气和观测几何条件下, 两传感器相似通道的天顶反射率之比通常被称为光谱匹配因子(SBAF)。SBAF 主要与观测几何条件、地表方向性反射特性、大气状况、光谱响应函数(SRF)等有关。

表 2 各目标各波段 BRDF 模型拟合的 RMSE
Table 2 RMSE of BRDF fitting for different bands over different sites

Band	RMSE of each site / %					
	Algeria-3	Algeria-5	Libya-1	Libya-4	Mauritania-1	Mauritania-2
Band 1	2.014	1.907	1.952	1.201	2.501	2.730
Band 2	2.352	2.282	2.103	1.098	2.815	3.136
Band 3	2.615	2.430	2.046	1.154	2.800	3.216
Band 4	2.324	2.187	1.881	1.109	2.537	2.935
Band 5	1.600	1.610	1.489	1.147	1.967	2.055
Band 6	0.992	1.031	0.833	0.920	1.445	1.480
Band 7	1.003	1.021	0.840	0.912	1.365	1.379
Band 8	1.176	1.067	0.895	0.990	1.408	1.397

图 4 显示了 MERSI 传感器第 8~16 波段和 SeaWiFS 对应波段的光谱响应函数情况。可见, MERSI 第 8~10 波段与 SeaWiFS 第 1~3 波段 of SRF 基本重合, MERSI 第 10、第 11 波段的中心波长比 SeaWiFS 第 4、第 5 波段的要窄, SeaWiFS 的第 6 波段位于 MERSI 第 13、第 14 波段中间, MERSI 第 15、第 16 波段的 SRF 比 SeaWiFS 的窄一些。为了展示不同传感器波段辐射信号所受气体吸收影响的差异, 在图 5 中叠加不同水汽和臭氧含量下模拟得到的沙漠上空的天顶反射率曲线。可以看出: 小于 700 nm 的波段主要受臭氧含量的影响, 表现为不同臭氧含量和相同水汽下的天顶辐射光谱曲线差异较大, 而相同臭氧含量和不同水汽下的天顶辐射光谱曲线基本重合; 大于 700 nm 的波段主要受水汽含量的影响, 光谱曲线特征与小于 700 nm 波段的刚好相反。

除了吸收气体外, 观测几何条件(太阳天顶角 θ_s , 观测天顶角 θ_v 和相对方位角 ψ) 也会影响 SBAF, 太阳角度和卫星角度越大, 辐射信号的传输路径越长, 吸收气体对 SBAF 的影响就越明显。因此, 在本文构建的 SBAF 参数化模型中将观测几何条件作为模型参数。

为了将 SBAF 参数化, 首先使用辐射传输模式 MODTRAN 对 SBAF 在不同的观测几何条件和吸收气体含量下进行大量模拟^[13]。为了尽可能保证模型精度和样本个数, 本文将天顶角限制在 60° 以内。对本研究团队收集的 ERA-Interim 数据进行分析后可知, 6 个沙漠目标上空水汽含量变化剧烈 ($0.2\sim 5\text{ g/cm}^2$), 臭氧值在 (0.28 ± 0.02) DU 左右, 模拟条件见表 3。

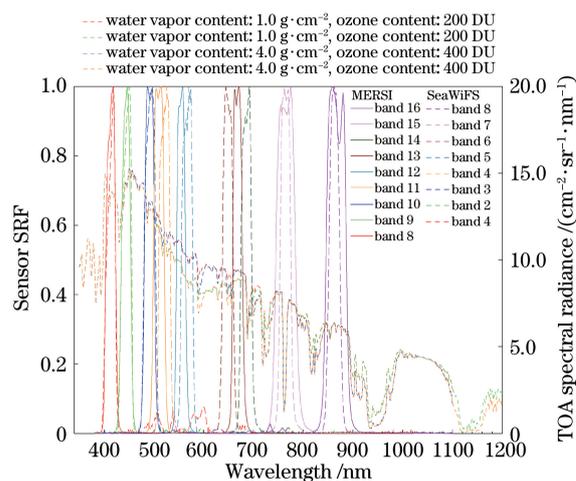


图 4 MERSI 和 SeaWiFS 的光谱响应函数以及不同吸收气体含量下模拟得到的沙漠上空的天顶辐射光谱曲线
Fig. 4 SRF of SeaWiFS and MERSI, as well as simulated TOA spectral radiance for four different scenarios of gaseous absorption over desert

表 3 MODTRAN 的模拟条件
Table 3 Simulation condition of MODTRAN

Simulation condition	Content
Surface	Desert
Aerosol model	Desert
Solar zenith angle / ($^\circ$)	0 to 60(step: 15)
Viewing zenith angle / ($^\circ$)	0 to 60(step: 10)
Relative azimuth angle / ($^\circ$)	0 to 180(step: 36)
Total water vapor content / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0 to 5.0(step: 1.0)
Total ozone content / (DU)	0 to 400(step: 100)

根据前文的分析, 可将几何大气质量因子 M 与吸收气体含量 C 一起作为参数化因子, 用来构建 SBAF 模型, 即

$$\begin{cases} \text{SBAF}_1 = \sum_{k=0}^1 a_k(M) \times C_{oz}^k, a_k(M) = \sum_{i=0}^4 b_i \times M^i \\ \text{SBAF}_2 = a_0 + \sum_{k=1}^4 a_k(M) \times C_{wv}^k, a_k(M) = \sum_{i=0}^2 b_i \times M^i \end{cases}, \quad (3)$$

式中： a, b 为拟合参数； $M = \frac{1}{\cos \theta_s} + \frac{1}{\cos \theta_v}$ 。SBAF₁ 是小于 700 nm 波段的模型表达式，其主要受臭氧和观测角度的影响；SBAF₂ 是大于 700 nm 波段的模型表达式，其主要受水汽和观测角度的影响。

对 MODTRAN 模拟计算得到的 SBAF 进行多项式拟合，求取最优参数使拟合误差最小。不同波段下的拟合参数见表 4，其中小于 700 nm 的第 8~14 波段的模型参数为 10 个，大于 700 nm 的第 15、第 16 波段的模型参数为 13 个。

表 4 9 个光谱通道的 SBAF 模型参数

Table 4 SBAF model parameters for nine spectral channels

Parameter	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14	Band 15	Band 16
P_1	1.704638	1.2734834	1.084228	2.273839	2.654799	1.286987	1.818853	1.071687	1.076728
P_2	-1.0202	-0.3986542	-0.12324	-1.78536	-2.28282	-0.24861	-0.99434	-0.06433	-0.07037
P_3	0.575016	0.21967103	0.069109	0.989652	1.251265	0.127415	0.543227	0.08658	0.057175
P_4	-0.14385	-0.0531473	-0.01697	-0.23772	-0.29688	-0.02819	-0.12874	-0.02126	-0.00996
P_5	0.013054	0.00468685	0.001506	0.020599	0.025414	0.002171	0.010725	0.015286	0.038343
P_6	-0.0828	-0.5411471	-0.21492	0.340805	1.092247	0.015543	3.770866	-0.03278	-0.02993
P_7	0.08351	0.7806828	0.308001	-0.53791	-1.62312	-0.0736	-5.38317	0.009528	0.005455
P_8	-0.04019	-0.4158658	-0.16288	0.303555	0.877055	0.055358	2.83456	0.00017	-0.0086
P_9	0.005171	0.0960645	0.037296	-0.07609	-0.20681	-0.01846	-0.64397	0.004814	0.006614
P_{10}	-4.8×10^{-5}	-0.0081476	-0.00314	0.006858	0.017685	0.00187	0.053729	-0.00176	-0.00123
P_{11}								-0.00024	0.000677
P_{12}								-0.00022	-0.00052
P_{13}								0.000114	9.82×10^{-5}

为了评估 SBAF 模型的有效性，本文将参数化公式预测的 SBAF 与 MODTRAN 模拟计算得到的 SBAF 进行了比较，比较结果见表 5。可以看出，第 8~12 波段和第 15、第 16 波段的参数化计算结果相对于模拟结果的平均偏差几乎为 0，第 13、第 14 波段的偏差较大，达到了 0.02 左右。这主要是因为采用 SeaWiFS 的第 6 波段对 MERSI 的第 13、第 14 波段进行了交叉定标，而这三个波段光谱的匹配性较差。综合分析后可知，各波段的拟合精度都较高，RMSE 均小于 1.5%，SBAF 模型可以有效预测 MERSI 的天顶反射率。

基于构建的伪不变目标 BRDF 天顶反射率模型和 SBAF 可以计算 MERSI 的天顶反射率。首先对伪不变目标的 MERSI 观测数据进行筛选和提取，剔除云污染及异常观测带来的影响；之后读取 MERSI 观测角度 $\Omega(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ ，采用(1)式所示的 BRDF 模型预测该角度上 SeaWiFS 传感器应观测到的天顶反射率；然后从 ERA-Interim 再分析资料中获取观测时刻目标上空吸收气体的含量，使用

表 5 公式预测的 SBAF 和模拟得到的 SBAF 的偏差

Table 5 Bias between parameterized and simulated SBAFs

Band	Bias mean	RMSE / %	Bias max	Bias min
Band 8	0.0109	1.0427	2.5898	-3.1593
Band 9	0.0004	0.2032	0.5175	-0.5880
Band 10	0.0001	0.1185	0.2919	-0.3660
Band 11	0.0053	0.7315	2.3717	-2.0748
Band 12	0.0063	0.8013	2.8750	-2.5399
Band 13	0.0206	1.4304	4.6135	-4.7072
Band 14	0.0194	1.3905	5.6749	-5.3018
Band 15	0.0076	0.8846	8.7129	-2.3706
Band 16	0.0011	0.3377	2.4990	-0.9414

(3)式所示的 SBAF 模型计算得到 MERSI 此时应观测到的天顶反射率的理论值，即

$$\rho_{\text{MERSI}}^{\text{TOA}} = \text{BRDF}(\Omega) \times \text{SBAF}(\Omega, C_{oz}, C_{wv}). \quad (4)$$

3.3 MERSI L1 表观反射率的计算

在 2011 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日期间，FY-3B MERSI 定标经历了两个阶段。2013 年 3 月 6 日之前的定标公式为

$$\rho_{\text{mea}}^{\text{TOA}} = \frac{(k_0 + k_1 \cdot \text{DN}) \cdot d^2}{100 \cdot \cos \theta_s}, \quad (5)$$

式中： $\rho_{\text{mea}}^{\text{TOA}}$ 为 DN(Digital Number)值经定标计算并通过太阳天顶角订正后得到的表观反射率； k_0 、 k_1 为定标系数； d 为日地平均距离。定标系数见表 6。

表 6 FY-3B MERSI 定标系数

Band	k_0	k_1
Band 8	-1.7816	0.02002
Band 9	-2.5908	0.02008
Band 10	-2.7469	0.0202
Band 11	-1.9051	0.02005
Band 12	-3.2241	0.02015
Band 13	-2.0301	0.0203
Band 14	-2.4053	0.02021
Band 15	-2.0037	0.02024
Band 16	-2.4507	0.02042

2013 年 3 月 6 日以后的定标公式为

$$\rho_{\text{mea}}^{\text{TOA}} = \frac{R \cdot d^2}{100 \cdot \cos \theta_s}, \quad (6)$$

式中： R 为反射率因子，可从 MERSI 数据中直接读

取得到。

4 评估结果

4.1 精度验证

以 MERSI 业务化定标结果作为参考值，对交叉定标后的 MERSI 表观反射率进行精度验证，计算 MERSI 观测值 $\rho_{\text{mea}}^{\text{TOA}}$ 和交叉定标模拟值 $\rho_{\text{mod}}^{\text{TOA}}$ 之间的相对偏差：

$$B = \frac{\rho_{\text{mod}}^{\text{TOA}} - \rho_{\text{mea}}^{\text{TOA}}}{\rho_{\text{mea}}^{\text{TOA}}}. \quad (7)$$

图 5 为 6 个伪不变目标的交叉定标表观反射率与根据 MERSI L1 定标系数计算的结果的相对偏差的均值和标准差。可以看出：Libya-4 相对偏差的标准差明显低于其他站点，而 Mauritania-2 相对偏差的标准差较大；与 MERSI L1 业务化定标结果相比，第 8~12 波段的表观反射率偏小，相对偏差小于 0，而第 13~16 波段的表观反射率偏高，相对偏差大于 0；除第 8 波段外的其他 8 个波段的相对偏差基本都在 5% 以内。

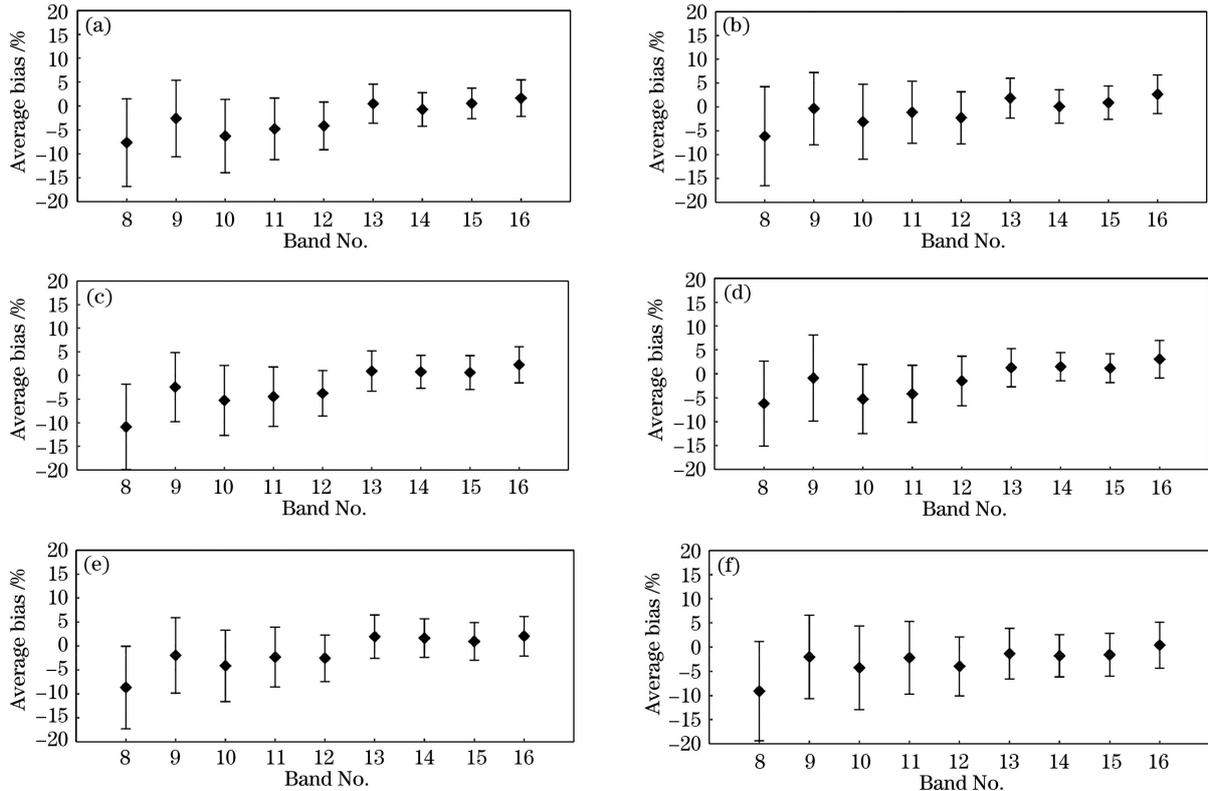


图 5 6 个伪不变目标的交叉定标表观反射率与 MERSI L1 业务化定标结果的相对偏差的均值(误差线表示相对偏差的标准差)。(a) Algeria-3;(b) Algeria-5;(c) Libya-1;(d) Libya-4;(e) Mauritania-1;(f) Mauritania-2

Fig. 5 Mean of the bias between modeled TOA reflectance and MERSI L1 TOA reflectance of the six pseudo-invariant targets (the error bar represents the standard deviation of the bias). (a) Algeria-3; (b) Algeria-5; (c) Libya-1; (d) Libya-4; (e) Mauritania-1; (f) Mauritania-2

4.2 稳定性验证

根据伪不变目标天顶反射率 ρ^{TOA} 长期稳定且规律性变化的特点,可以用它来验证交叉定标结果的时间稳定性。

图 6 为根据 L1 业务化定标系数计算得到的 6 个伪不变目标的天顶反射率以及本文交叉定标结果

的长时间序列分布和时间变化趋势。可以看出,根据 L1 定标系数计算得到的天顶反射率的时间变化趋势不稳定,与伪不变目标的特性不一致,而本文交叉定标结果的时间序列十分稳定且无明显趋势,与伪不变目标天顶辐射信号长期稳定且规律性变化的特点一致。

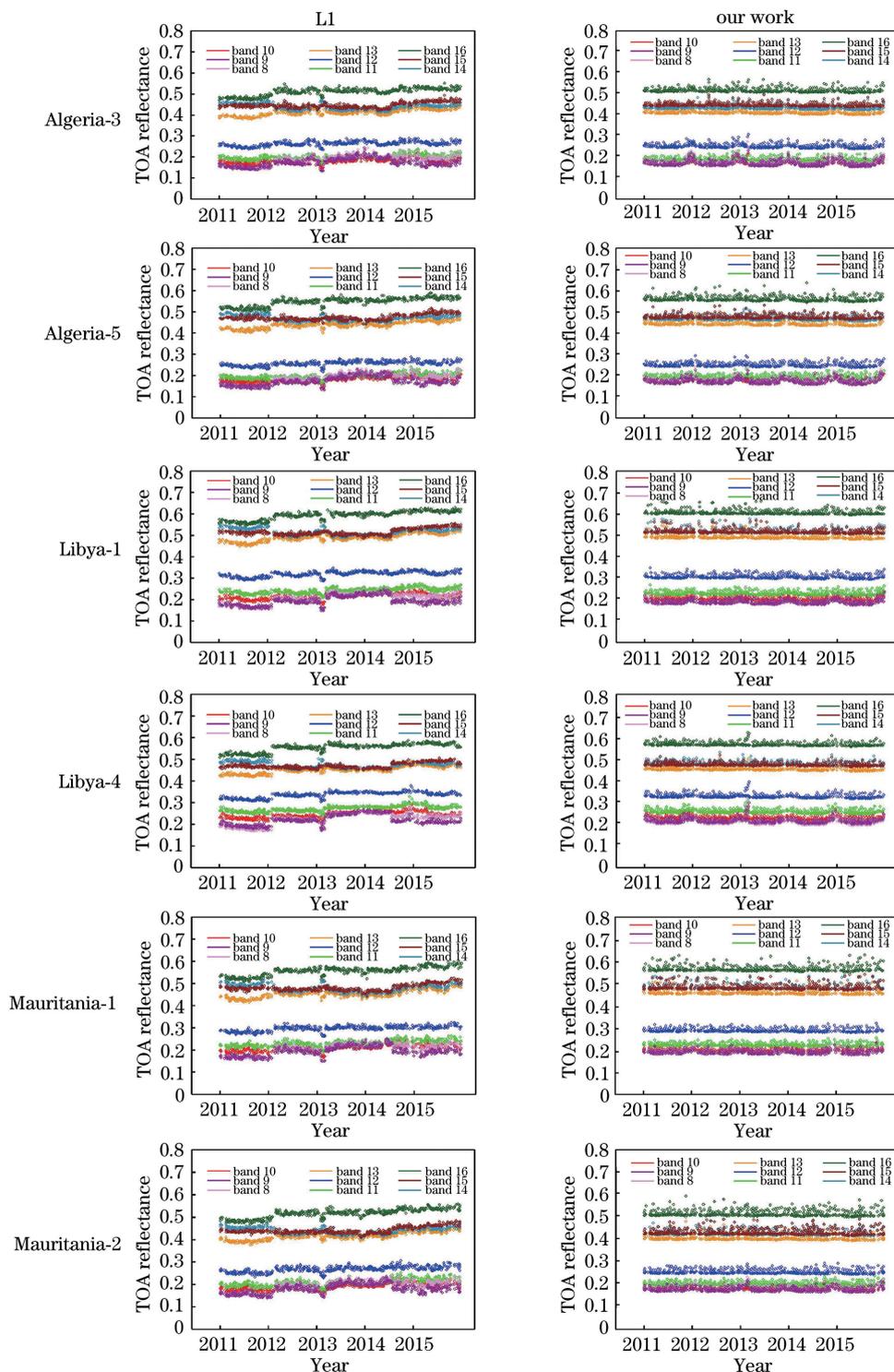


图 6 定标得到的天顶反射率时间序列

Fig. 6 ρ^{TOA} time series obtained by calibration

图 7 给出了交叉定标表观反射率和 MERSI L1 定标系数计算结果的月平均相对偏差的时间变化趋势。可以看出:波长小于 600 nm 的波段的月平均

偏差较大,特别是三个蓝光波段(第 8~10 波段);第 13~16 波段相对稳定,月平均相对偏差基本都在 $-5\% \sim 5\%$ 以内。

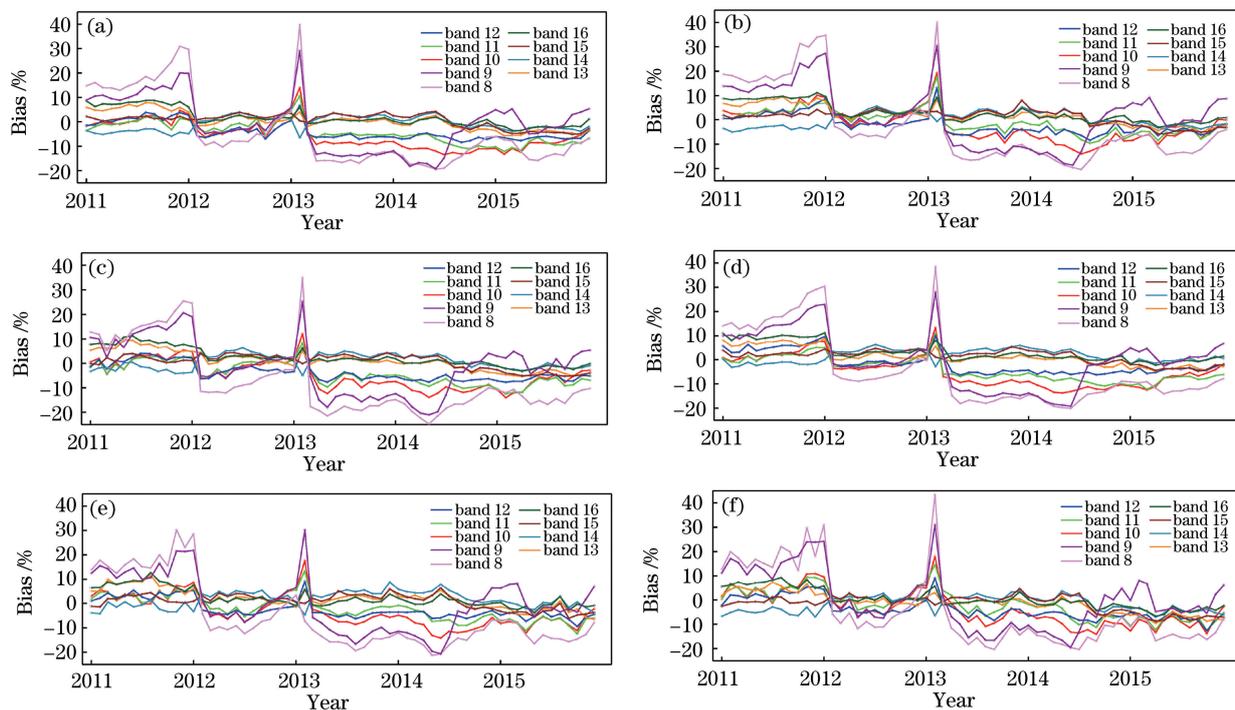


图 7 交叉定标表观反射率与 MERSI L1 定标数据在 2011—2015 年的月平均相对偏差时间序列。(a) Algeria-3; (b) Algeria-5; (c) Libya-1; (d) Libya-4; (e) Mauritania-1; (f) Mauritania-2

Fig. 7 Time series of monthly mean relative deviation from 2011 to 2015 between cross-calibration reflectance and MERSI L1 calibration data. (a) Algeria-3; (b) Algeria-5; (c) Libya-1; (d) Libya-4; (e) Mauritania-1; (f) Mauritania-2

5 结 论

针对 MERSI 可见光星上定标设备不完善、敦煌场地替代定标频次低的问题,本文以定标精度较高的 SeaWiFS 作为参考传感器,借助 MODTRAN 辐射传输模型和 ERA-Interim 再分析资料吸收气体数据,对 FY-3B MERSI 高信噪比窄波段通道进行了交叉定标研究。

交叉定标结果与根据 L1 定标系数计算的表观反射率相比,除了第 8 波段,其他 8 个波段定标的不确定性基本都在 5% 以内。两种方法得到的天顶反射率的长时间序列分布和时间变化趋势表明,L1 定标系数计算的天顶反射率的时间变化趋势不稳定,而本文交叉定标结果的时间序列十分稳定且无明显趋势,与伪不变目标天顶辐射信号长期稳定且规律性变化的特点一致。本文采用比 MODIS 数据定标精度更高的 SeaWiFS 数据进行 MERSI 高信噪比窄波段通道的定标研究,得到了高精度的天顶 BRDF 模型;并且,在更新相关光谱匹配模型的基础上,本

文所构建的 SeaWiFS 观测 BRDF 模型也可以用于其他传感器的交叉定标,具有很强的可移植性。在光谱匹配模型中考虑了观测几何条件这一因素的影响,相比限制观测在星下点附近的传统做法,本文方法在保证模型精度的前提下明显增加了 SBAF 的可用范围,使定标的采样点进一步增多,增强了定标系数时间序列趋势的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical satellite camera based on wide dynamic targets[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028004.
徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028004.
- [2] Yang T H, Hu X Q, Xu H L, et al. Radiation calibration accuracy assessment of FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder based on inter-comparison[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1130003.

- 杨天杭, 胡秀清, 徐寒列, 等. 基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1130003.
- [3] Hooker S B, McClain C R. The calibration and validation of SeaWiFS data [J]. Progress in Oceanography, 2000, 45(3/4): 427-465.
- [4] Sun L, Guo M H, Xu N, et al. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1869-1877.
- 孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1869-1877.
- [5] Sun L, Hu X Q, Guo M H, et al. Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4929-4942.
- [6] Hu X Q, Sun L, Liu J, et al. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4915-4928.
- [7] 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.
- 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.
- [8] Wang L, Hu X Q, Chen L. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1911-1920.
- 王玲, 胡秀清, 陈林. 基于多种亮度稳定目标的 FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1911-1920.
- [9] Li C, Xue Y, Liu Q H, et al. Post calibration of channels 1 and 2 of long-term AVHRR data record based on SeaWiFS data and pseudo-invariant targets [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 150: 104-119.
- [10] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, Albedo nadir reflectance products from MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 135-148.
- [11] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D18): 20455-20468.
- [12] Strahler A H, Lucht W, Schaaf C, et al. MODIS BRDF/Albedo product: algorithm theoretical basis document version 5. 0 [Z/OL]. [2020-05-14]. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf.
- [13] Acharya P K, Adler-golden S M, Anderson G P, et al. Modtran version 3. 7/4. 0 user's manual [Z/OL]. [2020-05-14]. <http://www.doc88.com/p-967176946236.html>.