

基于敦煌辐射校正场的GF-6/PMS时序绝对辐射定标方法

彭书杰 张运杰 韦玮 李新 黄冬 张勇 郑小兵

GF-6/PMS time-series absolute radiometric calibration method based on Dunhuang radiometric site

PENG Shujie, ZHANG Yunjie, WEI Wei, LI Xin, HUANG Dong, ZHANG Yong, ZHENG Xiaobing

引用本文:

彭书杰, 张运杰, 韦玮, 等. 基于敦煌辐射校正场的GF-6/PMS时序绝对辐射定标方法[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 177–186. DOI: 10.5768/JAO202647.0103001

PENG Shujie, ZHANG Yunjie, WEI Wei, et al. GF-6/PMS time-series absolute radiometric calibration method based on Dunhuang radiometric site[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 177–186. DOI: 10.5768/JAO202647.0103001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0103001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

级联积分球辐射源角度均匀性研究

Angular uniformity of cascaded integrating sphere radiation source

应用光学. 2022, 43(3): 481–487 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0303003>

基于激光振镜的高稳定辐照度定标光源

Highly-stable solar irradiance calibration light source based on laser galvanometer

应用光学. 2024, 45(1): 206–214 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0107002>

基于时空域滚动引导滤波的分尺度非均匀性校正算法

Scale-separated non-uniformity correction algorithm based on spatio-temporal rolling guidance filter

应用光学. 2025, 46(2): 309–318 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0202003>

基于EBAPS的光响应非均匀性测试方法研究

Research on test method of photoresponse non-uniformity based on EBAPS

应用光学. 2025, 46(3): 682–688 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0303004>

低温辐射计吸收腔组件的热分析方法

Thermal analysis method for absorption cavity module of cryogenic radiometer

应用光学. 2025, 46(4): 922–928 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0405004>

基于事件相机传感器的时序编码结构光系统设计

Design of temporal coded structured light system based on event-based camera sensor

应用光学. 2024, 45(5): 885–895 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0177-10

引用格式: 彭书杰, 张运杰, 韦玮, 等. 基于敦煌辐射校正场的 GF-6/PMS 时序绝对辐射定标方法 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 177-186.

PENG Shujie, ZHANG Yunjie, WEI Wei, et al. GF-6/PMS time-series absolute radiometric calibration method based on Dunhuang radiometric site[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 177-186.



在线阅读

基于敦煌辐射校正场的 GF-6/PMS 时序绝对辐射定标方法

彭书杰^{1,2}, 张运杰², 韦 玮², 李 新², 黄 冬², 张 勇³, 郑小兵²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 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, 安徽 合肥 230031;
3. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要: 为确保高分六号全色多光谱相机 (GF-6 panchromatic and multispectral sensor, GF-6/PMS) 遥感数据在精准农业的应用效果, 需及时校准载荷辐射性能参数。提出基于敦煌辐射校正场的 GF-6/PMS 自动化在轨辐射定标方法, 实现了 2019 年 7 月至 2024 年 11 月期间 GF-6/PMS 过境敦煌场 38 次的时序绝对辐射定标, 结果不确定度优于 4.15%, 并分析了场地均匀性对结果的影响。根据有效定标结果建立载荷辐射性能衰变模型, 分析出各波段辐射定标系数年变化在 0.16%~1.21%。此外, 以 Sentinel-2/MSI 为参考的 GF-6/PMS 载荷除全色波段外的各波段辐射衰变模型在敦煌场、Railroad Valley 场以及 La Crau 场验证中, 相对差异绝对均值在 2.34%~4.12%, 证明了该文对 GF-6/PMS 自动化在轨定标方法的有效性, 为保障 GF-6/PMS 遥感产品应用提供了数据支撑。

关键词: 时序辐射定标; 场地均匀性分析; GF-6/PMS; 趋势分析; 交叉验证

中图分类号: TN206; TP722.5

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0103001

GF-6/PMS time-series absolute radiometric calibration method based on Dunhuang radiometric site

PENG Shujie^{1,2}, ZHANG Yunjie², WEI Wei², LI Xin², HUANG Dong²,
ZHANG Yong³, ZHENG Xiaobing²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to ensure the effectiveness of GF-6 panchromatic and multispectral sensor (GF-6/PMS) remote sensing data in precision agriculture applications, timely calibration of the load radiation performance parameters is required. We proposed an automated on-orbit radiometric calibration method for GF-6/PMS based on the Dunhuang radiometric correction field, realized the time series absolute radiometric calibration of GF-6/PMS transit Dunhuang field for 38 times from July 2019 to November 2024, with the resultant uncertainty better than 5%, and analyzed the effect of the site uniformity on the results. The load radiation performance decay model was established based on the effective calibration results, and the annual variation of

收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-04-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3905300, 2023YFB3905305); 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金 (YZJJ202208-CX)

第一作者: 彭书杰, Email: saikunoodogo@163.com

通信作者: 张运杰, E-mail: zhangyj@aiofm.ac.cn

the radiation calibration coefficients in each band was analyzed to be in the range of 0.16%~1.21%. In addition, the absolute mean value of the relative difference of the GF-6/PMS load radiative decay models in all bands except panchromatic bands in the validation of Dunhuang, Railroad Valley, and La Crau site with Sentinel-2/MSI as the reference was in the range of 2.34%~4.12%, which could indicate that the validity of the automated GF-6/PMS on-orbit calibration method is not affected by the validity of the results in this paper. This demonstrates the validity of the automated on-orbit calibration method of GF-6/PMS and provides data support for the application of GF-6/PMS remote sensing products.

Key words: temporal radiometric calibration; site uniformity analysis; GF-6/PMS; trend analysis; cross validation

引言

作为我国高分专项空间基础设施的重要组成部分, GF-6 卫星于 2018 年第二季度完成在轨部署, 搭载的全色多光谱相机(PMS)分辨率达到全色 2 m、多光谱 8 m、幅宽 90 km, 其遥感影像主要面向农业等自然资源大面积精准监测, 为农业发展、生态监测等提供定量化的技术支撑^[1]。GF-6/PMS 发射前有效载荷的技术参数在实验室已经经过精确测定, 然而载荷在轨期间由于极端温度、光电元件老化等影响, 其辐射性能随时间发生变化, 需要通过辐射定标建立载荷输出 DN 值与入射辐亮度的定量关系, 以及及时校正卫星载荷的辐射性能响应^[2]。

目前, 基于 1 年 1 次公布的 GF-6/PMS 载荷绝对辐射定标系数, 无法及时监测和校正载荷辐射性能衰变。为保障 GF-6/PMS 载荷的应用效果, 应提高载荷生命周期中的定标频次, 及时跟踪和监测卫星载荷的性能变化。传统场地定标依赖人工现场同步观测, 存在试验成本高、时空匹配度低等固有缺陷^[3], 难以高频次实施遥感载荷在轨辐射定标。随后学界开发出基于无人值守的自动观测系统开展卫星遥感载荷在轨辐射定标的新方式^[4-5]。2014 年, 由国际对地观测委员会 (committee on earth observation satellites, CEOS) 主导的自动辐射定标场网 (RadCalNet) 计划正式启动。该计划通过遴选全球具备自动化辐射定标能力的标准化示范场地, 旨在实现多源遥感数据的高精度协同定标。经过多轮测试之后, 该计划为用户可提供时间分辨率 30 min、光谱分辨率 10 nm 的表现反射率产品, 这些产品广泛应用于 Landsat-7、Landsat-8 以及 Sentinel-2 等卫星载荷的定标和真实性检验^[6-7]。国内方面, 国家卫星气象中心联合中国科学院安徽光学精密机械研究所等从 2014 年开始, 开展了自动化定标研究、验证与观测设备的研制工作^[8]。

李新^[5]等综合分析了国外自动化定标的发展现状后, 提出了自动化观测仪器研制的关键技术和设计方案, 为后续自动化定标发展奠定了基础。邱刚刚^[9]、张孟^[10]以及吕佳彦^[11]等先后基于敦煌场的自动化观测数据, 对 AQUA/MODIS、TERRA/MODIS、SNPP/VIIRS 以及 FY3B/VIRR 等载荷进行自动化辐射定标实验, 其结果与星上定标结果差异小于 5%, 证明了基于自动化观测设备的场地替代定标方法, 可以替代传统人工同步测量定标方法, 在一定程度上降低了投入的成本, 提高了数据获取的一致性。

在高分辨率遥感卫星对精准辐射定标需求的驱动下, 自动化固定式靶标场技术因其可提供高均一性反射率基准, 逐渐成为高频次在轨定标的重要手段。然而, 现有靶标布设尺寸普遍难以覆盖 GF-6/PMS 载荷至少 10 pixel×10 pixel 空间采样区域的技术要求^[12-13], 导致靶标边缘辐射畸变误差显著。因此, 作者研究转向基于敦煌场的辐射定标方法, 但其空间均匀性成为制约高分辨率载荷定标精度的关键挑战。

本文通过敦煌场地表实验以及高分辨率影像数据统计, 定量分析了敦煌场的空间均匀性, 提出了基于敦煌场的 GF-6/PMS 自动化辐射定标方法, 显著提高 GF-6/PMS 在轨辐射定标频次, 可及时监测和校正载荷辐射性能衰变, 保障载荷数据应用精度。

1 卫星载荷与定标场

1.1 卫星载荷介绍

高分六号卫星搭载全色多光谱相机 (GF-6/panchromatic and multispectral sensor, GF-6/PMS), GF-6/PMS 载荷光谱通道参数如表 1 所示, 相机的相对光谱响应函数如图 1 所示。

表 1 GF-6/PMS 各波段主要参数

Table 1 Main parameters of each band of GF-6/PMS

波段(B#)	波段范围/nm	空间分辨率/m
全色(PAN)	450~900	2
蓝(Band2)	450~520	8
绿(Band3)	520~600	8
红(Band4)	630~690	8
近红外(Band5)	760~900	8

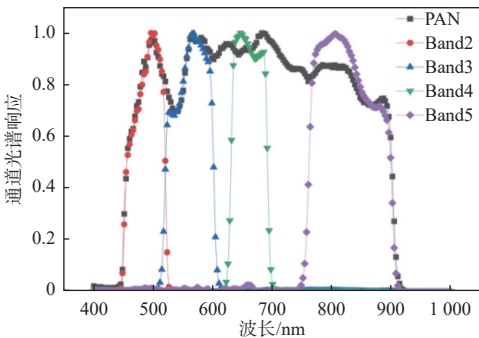


图 1 GF-6/PMS 相对光谱响应函数

Fig. 1 GF-6/PMS relative spectral response

1.2 定标场

敦煌场作为中国遥感卫星辐射校正场的重要组成部分,场地中心区域 10 km×10 km 范围内具有单一、稳定的地物特征,且大气干洁、稳定,全年晴朗天数较多,是一个较为理想的替代定标场地^[14]。

为了克服传统人工测量定标方法的局限性,提高卫星载荷的定标频次,在敦煌场部署了由通道式地对地辐射计(automated test-site radiometer, ATR)、高精度太阳辐射计(precision solar radiometer, PSR)组成的自动化观测系统。ATR 放置在高 1.8 m 的支架上,视场覆盖正下方直径 30 cm 的圆形区域,每间隔 3 min 采集一次数据,用于测量地表反射辐亮度。PSR 在无遮挡处布设,实时跟踪太阳,用于反演大气气溶胶光学厚度和水汽含量。自动化观测系统中所有设备均能够长期部署在场地,实现无人值守、自动化测量、远程传输数据等^[9]。仪器

基本参数如表 2 所示。

表 2 测量仪器参数

Table 2 Measuring instrument parameters

仪器	中心波长/nm	数据传输方式
ATR	400, 450, 500, 600, 675, 810, 1 000, 1 550	北斗卫星
PSR	365, 412, 500, 610, 675, 862, 940, 1 025	4G网络

1.3 场地均匀性分析

敦煌场相较于人工固定靶标作为高分辨率载荷替代定标的场地,天然的大面积均匀区域极大地满足了场地均匀区域面积应大于待定标遥感器 10 pixel×10 pixel 的要求,多年来完成了国内外中低分辨率卫星载荷在轨辐射定标。随着近年来载荷向着高分辨率趋势发展,业界对于敦煌场的空间均匀性是否适合高分辨率载荷定标抱有疑惑。

为了从数据上反映敦煌场地表均匀性在高分辨率对地卫星观测下的表现情况,开展了敦煌场实地试验以及高分辨率载荷影像数据分析,从模拟场地在不同分辨率遥感器观测下的地表反射率、高分辨率载荷影像中的区域 DN 值的相对偏差两方面定量分析敦煌场地表均匀性。

1.3.1 不同分辨率遥感器观测下的场地反射率

为模拟不同分辨率遥感器下的敦煌场地表反射率情况,通过无人机搭载地物光谱仪 SVC(XHR-1024i),在敦煌场上空 5 m~300 m 的不同高度悬停,以 25°的视场垂直观测敦煌场,计算不同地面视场大小的地表反射率,模拟不同地面分辨率载荷的对地观测情况。计算公式为

$$\rho_h(\lambda) = \frac{L_h(\lambda)}{L_p(\lambda)} \rho_p(\lambda) \tag{1}$$

式中: $\rho_h(\lambda)$ 为对应的地表反射率; $L_h(\lambda)$ 为地表辐亮度; $L_p(\lambda)$ 为无人机飞行前后手持 SVC 垂直同步测量漫反射参考板的辐亮度; $\rho_p(\lambda)$ 为漫反射参考板实验室标定的反射率。

不同飞行高度下,25°视场角对应的遥感器空间分辨率如表 3 所示。

表 3 不同飞行高度下 25°视场角对应的遥感器空间分辨率

Table 3 Spatial resolution of remote sensors corresponding to 25° field of view at different flight altitudes

高度/m	5	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	300
分辨率/m	2.2	4.4	8.8	17.7	26.6	35.4	44.3	53.2	62.0	70.9	79.8	88.6	133.1

模拟不同分辨率载荷观测下的场地反射率,反射率之间的相对偏差如图 2 所示。

以上计算的地表反射率数据初步表明,敦煌场在不同分辨率的载荷观测下,除吸收波段外,其他

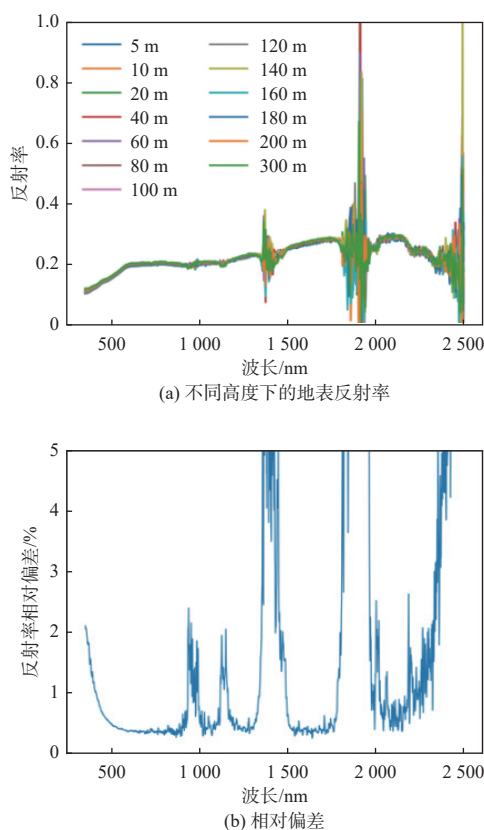


图2 模拟不同分辨率载荷的对地观测情况

Fig. 2 Simulation of site observation with different resolution loads

波段的地表反射率数据相对偏差基本在 2% 以内, 表现较为一致。

1.3.2 高分辨率影像中的场地均匀性

当定标场域内大气参数具有空间均一性时, 地表的辐射特性和大气层顶的辐射特性相似, 可以使用表观反射率来代替地表反射率进行均匀性分析。基于此, 可通过计算影像像元 DN 值的均值, 与标准差直接量化场区均匀性指标^[15]。

本文通过选取 2018 年 7 月至 2024 年 5 月的 24 幅 GF-6/PMS 影像、20 幅 GF-2/PMS 影像, 按照敦煌场 (40.14°N, 94.32°E) 为中心经纬度, 以 500 m×500 m、1 km×1 km、3 km×3 km 为范围提取影像像元 DN 值来计算场地均匀度, 评估敦煌场不同面积下的均匀性, 即:

$$CV = \frac{S}{E} \times 100\% \quad (2)$$

式中: CV 为均匀度指标, S 和 E 分别为对应范围内像元 DN 值标准差和平均值。

2018 年 7 月至 2024 年 5 月高分辨率载荷影像中的敦煌场均匀性指标如图 3 所示。

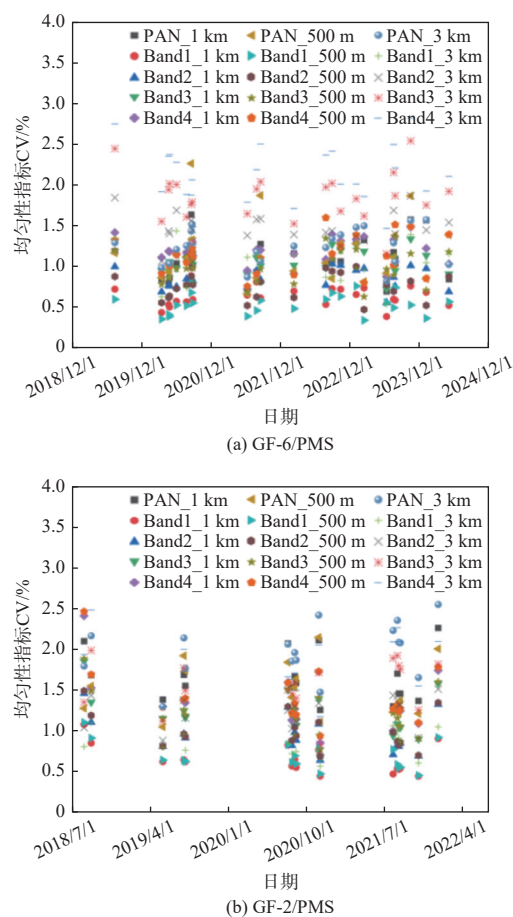


图3 敦煌场均匀性指标 CV

Fig. 3 Dunhuang site uniformity indicator CV

从图 3 中可以看出, 在 GF-6/PMS、GF-2/PMS 载荷高分辨率、长时序观测下, 敦煌场各波段均匀性指标 CV 均 $< 3\%$, 表明敦煌场不同面积内 (3 km×3 km) 的均匀性较好, 多年来场地情况也较稳定。

综合上述 2 个试验结果, 初步验证了敦煌场大面积区域范围内的空间均匀性, 能长年适用 GF-6/PMS 高频次绝对辐射定标。同时, 相较于人工靶标方式增加了载荷观测目标区域范围内的像元数量, 减少了噪声影响, 保障定标结果的稳定性。

2 定标方法

基于敦煌场布设的自动化观测系统在卫星过境时同步观测的数据, 采用反射率基法^[16] 构建 GF-6/PMS 自动化辐射定标流程, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 数据处理主要包括 ATR、PSR 测量数据获取、处理, 地表反射率计算、数据质量控制、定标系数计算。下面对自动化辐射定标流程中的核心步骤进行详细介绍。

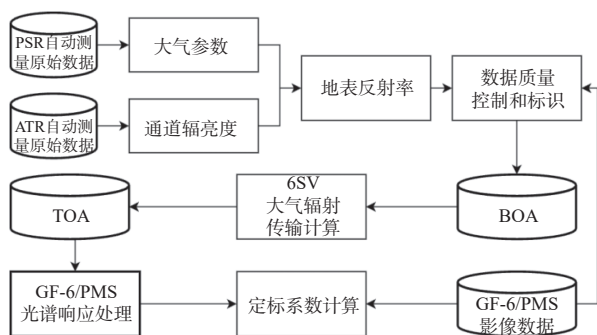


图4 GF-6/PMS 自动辐射定标标准化处理流程

Fig. 4 GF-6/PMS automated radiometric calibration standardization process

2.1 地表反射率计算

敦煌场地地表反射率准确获取是确保后续定标结果可靠性和精度的前提, 计算过程中利用敦煌场部署的 ATR 测量的各通道地面目标反射辐亮度, 结合 PSR 测量数据反演的大气参数: 主要包括 550 nm 气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth at 550 nm, AOD550)、大气柱水汽含量 (precipitable water vapor, PW, 见图 5 所示) 等, 带入大气辐射传输模型, 可得到地面总照度, 再将两者的值带入式 (3), 计算得到对应通道的地表反射率:

$$\rho_i = \frac{\pi L_i}{E_i} \quad (3)$$

式中: ρ_i 为对应各通道地表反射率; L_i 为 ATR 各通道处理得到的地面目标反射辐亮度; E_i 为各波段太阳辐射到达地面的总照度。

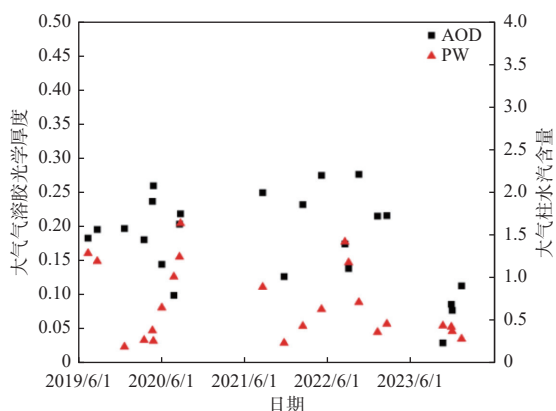


图5 GF-6 过境时敦煌场时气溶胶光学厚度和水汽含量

Fig. 5 Aerosol optical depth and water vapor content at Dunhuang site during GF-6 transit

为满足不同光谱设置的载荷在轨辐射定标, 需要将通道地表反射率扩展成高光谱反射率。以场地的历史高光谱地表反射率数据为参考, 选择光谱形状最接近的高光谱反射率曲线, 经过平移得到实时地表高光谱反射率。平移量可以由式 (4) 计

算得到:

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{\rho_i - k - \rho_{\text{ref}i}}{\rho_i} \right)^2} \quad (4)$$

式中: k 为平移量; $\rho_{\text{ref}i}$ 为参考曲线中 ATR 各通道地表反射率; 当 W 处于极小值时, k 即为最优的平移量。图 6 大致说明了通道反射率到高光谱反射率的获取过程。

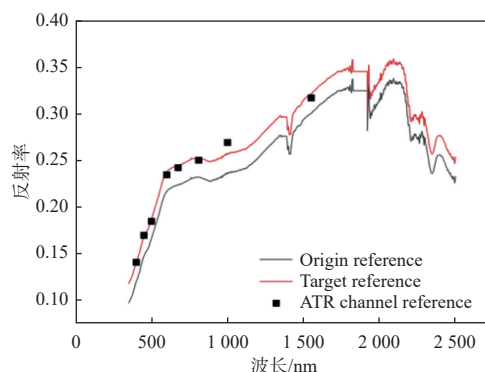


图6 高光谱地表反射率获取过程

Fig. 6 Hyperspectral surface reflectance acquisition process

由于 ATR 垂直方向观测与卫星观测存在角度偏差, 需要结合敦煌场实测的双向反射分布函数 BRDF 校正实时地表高光谱反射率, 得到卫星观测方向的地表高光谱反射率, 即:

$$\rho_2(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{R_2(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda)}{R_1(\theta_s, \varphi_s, 0, 0, \lambda)} \rho_1(\theta_s, \varphi_s, 0, 0, \lambda) \quad (5)$$

式中: $\rho_2(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ 为卫星观测方向的地表高光谱反射率; θ_s 、 φ_s 、 θ_v 、 φ_v 分别为太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角; $R_2(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ 为卫星观测方向的反射率因子; $R_1(\theta_s, \varphi_s, 0, 0, \lambda)$ 为垂直方向的反射率因子; $\rho_1(\theta_s, \varphi_s, 0, 0, \lambda)$ 为实时地表高光谱垂直反射率。BRDF 校正过程如图 7 所示。

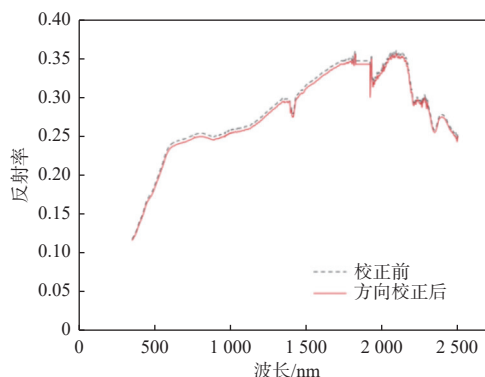


图7 BRDF 方向校正

Fig. 7 BRDF direction correction

采用这种方法计算地表反射率的好处是,消除了传统使用漫反射参考板和人工操作的误差,同时使得地表反射率可以自动化测量,提高了反射率数据的一致性。

2.2 数据质量控制

为了提高单次定标的可靠性和时序定标的

稳定性,根据自动化观测系统获取、处理的数据,并结合敦煌场多年来的场地特性,构建了如图8所示的标准辐射质量控制流程。从图8中可以看出,流程为地表异常→大气异常→卫星角度异常→区域均匀性异常。下面对质量控制流程进行介绍。

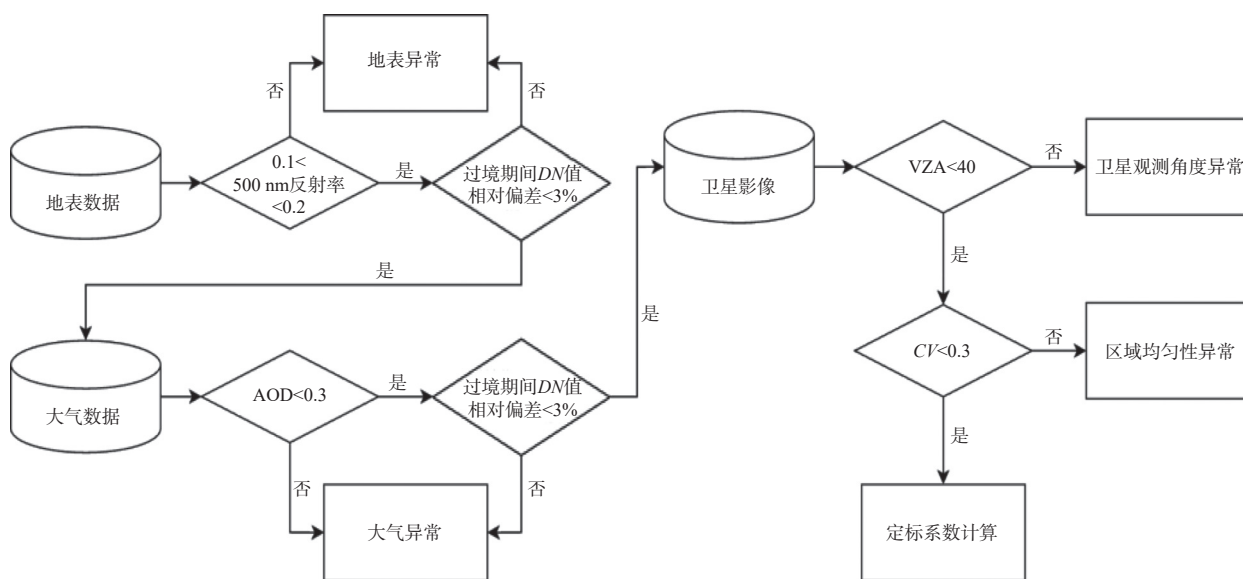


图8 标准辐射定标数据质量控制方法

Fig. 8 Standard radiometric calibration data quality control method

1) 地表异常判断。根据 ATR 观测数据和敦煌场多年场地特性判断,载荷过境前后 5 min 内 500 nm 处的地表反射率结果需处于 0.1~0.2 之间,以剔除雨雪等异常天气的影响;该期间 DN 值相对偏差小于阈值 3%,保证期间天气稳定。

2) 大气异常判断。根据 PSR 处理后的数据判断载荷过境前后 5 min 内 AOD550 需小于阈值 0.3,且期间 DN 值相对偏差小于阈值 3%,保证大气稳定。

3) 卫星角度异常判断。根据 GF-6/PMS 影像中的角度数据信息判断,卫星观测角度(VZA)需小于阈值 40°。

4) 区域均匀性异常判断。根据获取的 GF-6/PMS 影像中目标经纬度 500 m×500 m 范围内区域均匀性指标 CV 值判断, CV 需小于阈值 3%,减少卫星观测路径上薄云的影响。

2.3 定标系数计算

将卫星过顶时的实时卫星方向、地表高光谱反射率、气溶胶光学厚度 AOD550、大气柱水汽含量 PW 和臭氧 O₃ 含量、卫星和太阳的天顶角与方位角等参数输入到 6SV 大气辐射传输模型,可获得卫星入瞳处高光谱表观辐亮度,与 GF-6/PMS 光

谱响应函数进行卷积,获得 GF-6/PMS 入瞳处对应波段的等效辐亮度:

$$L_i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) f_{\text{RSR}_i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_{\text{RSR}_i}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

式中: L_i 为 GF-6/PMS 波段 i 的等效辐亮度; $L(\lambda)$ 为卫星入瞳处高光谱表观辐亮度; $f_{\text{RSR}_i}(\lambda)$ 为 GF-6/PMS 波段 i 的相对光谱响应函数。

根据过境时刻 GF-6/PMS 波段 i 的等效辐亮度、对应影像中提取的各波段目标区域 500 m×500 m 内的像元 DN 值的平均值,计算出 GF-6/PMS 各波段定标系数:

$$k_i = \frac{DN_i}{L_i} \quad (7)$$

式中: k_i 为 GF-6/PMS 各波段定标系数; DN_i 为各波段区域 DN 值平均值。

3 定标结果分析及精度验证

3.1 定标结果及不确定度分析

基于前面介绍的 GF-6/PMS 载荷自动辐射定标

方法,得到2019年7月至2024年11月期间GF-6/PMS载荷时序绝对辐射定标系数,结果如图9所示。图9中实心点代表绝对辐射定标系数。

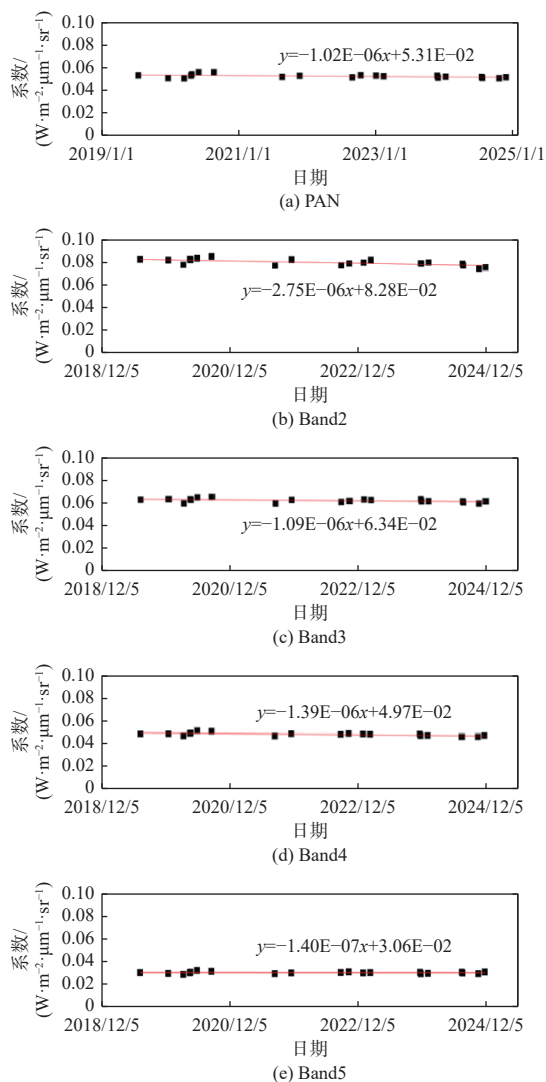


图9 GF-6/PMS 载荷高频次绝对辐射定标结果及趋势分析
Fig.9 Trend analysis and high frequency absolute radiometric calibration results of GF-6/PMS sensors

为了验证场地均匀性对定标结果的影响,以500 m×500 m、1 km×1 km、3 km×3 km、5 km×5 km、10 km×10 km 均匀性指标 CV 逐渐增大的趋势,提取区域平均 DN 值,计算各面积下时序定标结果的标准差,表征定标结果的稳定性,如图10所示。从图10中可以看出,场地均匀性不足会降低辐射定标结果的稳定性,表现为定标系数波动幅度增大。

GF-6/PMS 定标结果的不确定性主要来自大气层顶(top of the atmosphere, TOA)辐亮度计算的不确定性,包括方向地表反射率、大气参数和6SV辐射传输模型计算的不确定性。

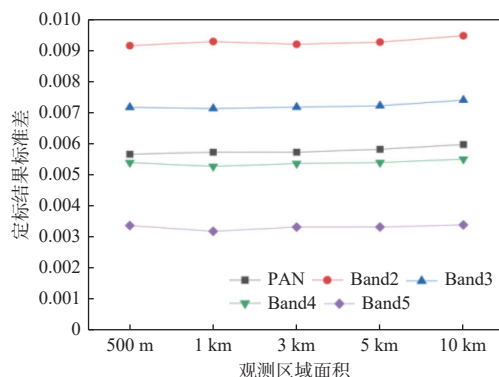


图10 不同场地均匀性下GF-6/PMS 载荷各波段定标结果的偏离程度

Fig.10 Deviation degree of GF-6/PMS load calibration results in each band for different site homogeneity

方向地表反射率的不确定性由ATR测量、6SV模拟的太阳总照度、场地均匀性、高光谱扩展、BRDF校正组成,可以根据式(8)计算:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial L_{ATR}}\Delta L_{ATR}\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta E\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\omega}\Delta\omega\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial scale}\Delta scale\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial BRDF}\Delta BRDF\right)^2} \quad (8)$$

式中: ΔL_{ATR} 为ATR测量辐亮度的不确定度,由实验室中“灯-板系统”定标装置测得的不确定度优于2%^[14]; ΔE 为6SV模拟的太阳到达地面的总照度,涉及到大气参数不确定度2%^[14, 17-18],太阳辐照度模型1.5%^[17-18],6SV计算误差0.6%^[19]; $\Delta\omega$ 为场地均匀性不确定度,通过500 m×500 m内场地均匀性 CV 来计算,不确定度优于1.27%; $\Delta scale$ 为高光谱扩展的不确定度,根据ATR观测值和拟合值相对差异的标准差计算,不确定度优于0.65%^[14]; $\Delta BRDF$ 为BRDF模型的不确定度,为0.93%^[20]。将以上参数代入式(8),计算出方向地表反射率不确定度优于3.67%。

进一步利用蒙特卡洛方法计算出方向地表反射率对TOA辐亮度计算的不确定度,按照GF-6/PMS各波段分别为3.09%、2.59%、3.11%、3.59%和3.54%,同样计算大气参数对TOA辐亮度计算的不确定度约为2%,结合6SV的计算误差,得到总不确定度分别为3.72%、3.32%、3.74%、4.15%和4.10%。

3.2 载荷辐射性能衰变趋势分析

根据GF-6/PMS载荷时序定标结果,通过线性拟合得到载荷辐射性能衰变模型,如图9中的直线

所示。采用 D_{annual} 年变化率指标^[21-23]对 GF-6/PMS 载荷辐射性能衰变趋势进行定量分析,即:

$$D_{\text{annual}} = \frac{D_{\text{total}}}{x_{\text{end}} - x_1} \times 365 \quad (9)$$

式中, D_{total} 为载荷在特定运行时间范围内的总衰减率,可通过式(10)表示为

$$D_{\text{total}} = \frac{f(x_1) - f(x_{\text{end}})}{f(x_1)} \times 100\% \quad (10)$$

式中: f 为通过线性拟合建立的系数随时间的模型; x_1 和 x_{end} 分别为 GF-6/PMS 时序辐射定标结果的初始日期和结束日期。基于该模型对 GF-6/PMS 载荷的辐射定标系数进行量化分析,结果显示,各波段绝对辐射定标系数的年变化率依次为 0.70%, 1.21%, 0.63%, 1.02%, 0.17%。

3.3 定标结果交叉验证

为评估基于敦煌场的 GF-6/PMS 时序定标结果得到的载荷辐射性能衰变趋势模型的可靠性,采用交叉验证的方法,选取星上定标不确定度为 5%^[24] 的 Sentinel-2/MSI 数据作为参考基准。因为 GF-6/PMS 全色波段与 Sentinel-2/MSI 参考载荷在光谱设置上无法匹配,本文交叉验证范围限定于蓝光 (Band2)、绿光 (Band3)、红光 (Band4) 及近红外 (Band5) 4 个光谱波段。此外,选择敦煌戈壁场、Railroad Valley 盐碱场以及 La Crau 草地场 3 种不同地表反射率场地作为交叉验证的地面参考场

景,选取的交叉验证样本要求目标载荷和参考载荷过境时各交叉验证场时间差异在一周内(敦煌场则在 1 h 内),观测天顶角差异小于 10°,其中 GF-6/PMS 和 Sentinel-2/MSI 在敦煌定标场戈壁、美国 Railroad Valley 盐碱场以及 La Crau 草地成功匹配的影像分别有 11 对、4 对、5 对,用于验证本文结果对国内外不同地物特征场地的适用性。

由于 Sentinel-2、GF-6 过境同一目标区域时的时间、观测角度、光谱响应范围存在差异,在交叉验证过程中根据场地各自部署的自动化观测数据(敦煌场自动化观测系统、RadCalNet 产品),分别得到 GF-6、Sentinel-2 过境时刻的 TOA 辐亮度,进而计算出交叉验证匹配因子。将参考载荷 Sentinel-2/MSI 对应交叉验证场景的观测值经过光谱匹配,并将上述计算出的交叉匹配因子转换成目标载荷 GF-6/PMS 各波段 TOA 辐亮度,将它们作为参考,与 GF-6/PMS 载荷辐射性能衰变趋势模型反演的 TOA 辐亮度进行比较,可得二者相对差异,结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,以 Sentinel-2/MSI 为参考载荷的 GF-6/PMS 载荷交叉验证结果中,蓝、绿、红、近红外波段的相对差异绝对平均值分别为 2.34%、2.67%、4.12% 和 3.87%,全部相对差异都在 ±8% 以内,说明基于敦煌场的 GF-6/PMS 载荷辐射定标结果拟合得到的载荷辐射性能衰变趋势模型稳定可靠。

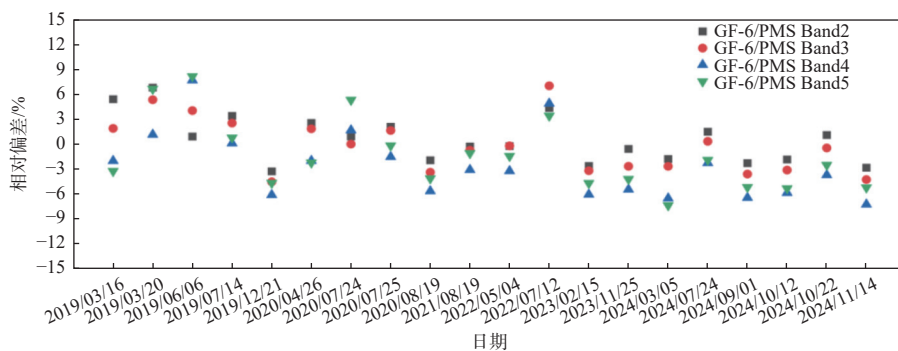


图 11 以 Sentinel-2/MSI 为参考载荷的 GF-6/PMS 载荷交叉验证结果

Fig. 11 Cross-validation results of GF-6/PMS payload with Sentinel-2/MSI as reference

4 结论

为保证 GF-6/PMS 数据产品精度和高频次定标需求,在敦煌场地表实验和高分辨率影像数据统计定量分析场地的空间均匀性的基础上,介绍了基于敦煌场的 GF-6/PMS 自动化辐射定标方法,实现了 2019 年 7 月至 2024 年 11 月期间 GF-6/PMS 过境敦煌场 38 次的时序绝对辐射定标,结果不确定

度优于 4.15%,且分析出场地均匀性不足会降低辐射定标结果的稳定性。根据有效定标结果建立载荷辐射性能衰变模型,分析出各波段辐射定标系数年变化在 0.16%~1.21%。此外,以 Sentinel-2/MSI 为参考的 GF-6/PMS 载荷中蓝、绿、红和近红外通道衰变模型反演的定标系数,在敦煌场、Railroad Valley 场以及 La Crau 场交叉验证结果的相对差异

绝对平均值在 2.34%~4.12%。

本文提出的基于敦煌场 GF-6/PMS 自动化辐射定标方法, 显著提升了载荷在轨定标频次, 实现载荷辐射性能的长期监测, 为 GF-6/PMS 在农业、林业的精准观测应用提供了多源数据支撑。

参考文献:

- [1] 张艳, 赵平, 余建英, 等. 基于 GF-1 PMS/GF-6 PMS 的水稻种植区识别方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(7): 18-21.
ZHANG Yan, ZHAO Ping, YU Jianying, et al. Research on identification method of rice planting areas based on GF-1 PMS/GF-6 PMS [J]. Geomatics & Spatial Information Technology. 2024, 47(7): 18-21.
- [2] 徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 高分辨率光学遥感卫星小目标法在轨辐射定标[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 951-957.
XU Weiwei, ZHANG Liming, LI Xin, et al. In-flight radiometric calibration of high spatial resolution satellite optical sensor using small targets[J]. Journal of Applied Optics. 2019, 40(6): 951-957.
- [3] 巩慧, 田国良, 余涛, 等. CBERS02B 卫星 CCD 相机在轨辐射定标与真实性检验[J]. 遥感学报, 2010, 14(1): 1-12.
GONG Hui, TIAN Guoliang, YU Tao, et al. Vicarious radiometric calibration and validation of CBERS02B CCD data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2010, 14(1): 1-12.
- [4] CZAPLA-MYERS J S, THOME K J, LEISSO N P. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley, Nevada[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(5): 474-487.
- [5] 李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 场地自动化定标技术进展[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 17-21.
LI Xin, ZHENG Xiaobing, YIN Yapeng. Progress in automated site vicarious calibration technologies[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 17-21.
- [6] ALHAMMOUD B, JACKSON J, CLERC S, et al. Sentinel-2 level-1 radiometry assessment using vicarious methods from DIMITRI toolbox and field measurements from RadCalNet database[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(9): 3470-3479.
- [7] JING X, LEIGH L, TEIXEIRA PINTO C, et al. Evaluation of RadCalNet output data using Landsat 7, Landsat 8, Sentinel 2A, and Sentinel 2B sensors[J]. Remote Sensing, 2019, 11(5): 541.
- [8] 郑小兵, 李新, 胡秀清, 等. 风云气象卫星光学载荷场地辐射定标技术发展综述 (特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(18): 64-88.
ZHENG Xiaobing, LI Xing, HU Xiuqin, et al. Review on development of site radiometric calibration technology for optical remote sensors of Fengyun meteorological satellites (invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(18): 64-88.
- [9] 邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的载荷在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 9-17.
QIU Ganggang, LI Xin, WEI Wei, et al. Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 9-17.
- [10] 张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地自动化观测技术的 SNPP VIIRS 高频次在轨辐射定标[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 155-166.
ZHANG Meng, WEI Wei, ZHANG Yanna, et al. High-frequency on-orbit radiometric calibration of SNPP VIIRS based on in site automated observation technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 155-166.
- [11] 吕佳彦, 陈林, 何明元, 等. 基于敦煌辐射校正场的 FY3B/VIRR 反射太阳波段衰减分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(8): 2397-2401.
LYU Jiayan, CHEN Lin, HE Mingyuan, et al. Degradation analysis for FY3B /VIRR reflective solar bands based on the dunhuang radiometric calibration site[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(8): 2397-2401.
- [12] 徐伟伟, 张黎明, 沈政国, 等. 高分辨光学卫星传感器在轨 MTF 检测[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(2): 97-111.
XU Weiwei, ZHANG Liming, SHEN Zhengguo, et al. On-orbit MTF estimation of high resolution satellite optical sensor[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(2): 97-111.
- [13] 韩启金, 张学文, 乔志远, 等. 高分一号卫星 PMS 相机多场地宽动态辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 127-133.
HAN Qijin, ZHANG Xuwen, QIAO Zhiyuan, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites[J]. Infrared and Laser Engineering,

- 2015, 44(1): 127-133.
- [14] 黄冬. 基于敦煌辐射校正场的高精度自动化定标方法研究及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- HUANG Dong. Research and application of high-precision automated vicarious calibration method based on Dunhuang test site[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [15] 韦玮. 基于全球定标场网的卫星遥感器长时间序列定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- WEI Wei. Research on long time series Radiometric calibration of satellite sensor based on global calibration site network[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [16] BIGGAR S F. In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration[M]. Arizona: The University of Arizona, 1990.
- [17] MA L, ZHAO Y, WOOLLIAMS E R, et al. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1696.
- [18] WENNY B N, THOME K. Look-up table approach for uncertainty determination for operational vicarious calibration of Earth imaging sensors[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(6): 1357-1368.
- [19] VERMOTE E F, TANRE D, DEUZE J L, et al. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV)[C]. New York: IEEE, 2006.
- [20] 余谭其, 韦玮, 张艳娜, 等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 197-206.
- YU Tanqi, WEI Wei, ZHANG Yanna, et al. Analysis of the BRDF characteristics of dunhuang radiometric calibration site in the spring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 197-206.
- [21] ZHONG B, MA Y, YANG A, et al. Radiometric performance evaluation of FY-4A/AGRI based on Aqua/MODIS[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1859.
- [22] 刘耀开, 马灵玲, 王任飞, 等. 基于自动辐射定标场的高分六号宽幅载荷时序绝对辐射定标及趋势分析[J]. *遥感学报*, 2023, 27(3): 599-609.
- LIU Yaokai, MA Lingling, WANG Renfei, et al. Time-series absolute radiometric calibration and trend analysis of the wide swath sensor onboard GF-6 satellite with automatic radiometric calibration site[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(3): 599-609.
- [23] 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 Lin, XU Na, HU Xiuqing, 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.
- [24] REVEL C, LONJOU V, MARCQ S, et al. Sentinel-2A and 2B absolute calibration monitoring[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2019, 52(1): 122-137.