

FY-4A/AGRI 反射波段的深对流云辐射定标

张北^{1,2}, 胡秀清^{1,2}, 周为伟^{1,3}, 沙金⁴, 陈林^{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 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003;

4. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016

摘要: 风云四号 A 星 (FY-4A) 先进的静止轨道辐射成像仪 AGRI (Advanced Geostationary Radiation Imager) 已进入设计寿命末期阶段, 部分太阳反射通道的辐射性能出现明显退化, 影响了定量遥感产品应用精度。本研究采用基于深对流云 DCC (Deep Convective Cloud) 的定标跟踪方法对 AGRI 反射波段辐射响应变化进行定量评估。为提高评估的精度和稳定性, 探究 DCC 方法对红外亮温阈值、像元邻域空间均一性条件和 DCC 角度分布模型 ADM (Angle Distribution Model) 的敏感性。结果表明: 对于红外亮温阈值, 可见光通道 DCC 反射率均值的敏感性高于概率密度函数 PDF (Probability Density Function) 峰值反射率; 而在短波红外通道, DCC PDF 峰值反射率的敏感性略高于反射率均值。此外, 在可见光—近红外波段采用 CERES ADM 模型能较好地校正 DCC 反射率各向异性的影响, 且明显优于 Hu 模型, 但两种 ADM 模型在短波红外波段均无明显校正效果。基于上述敏感性研究, 本研究优化了 DCC 方法中的阈值选择和 ADM 策略, 对 2017 年 3 月—2023 年 4 月 FY-4A/AGRI 反射波段的辐射响应进行跟踪评估。评估结果发现: 0.47 μm 、0.65 μm 和 2.25 μm 通道出现显著退化, 总衰减率分别为 45.55%、26.22% 和 6.362%。该评估结果可为 AGRI 反射波段定标系数更新提供依据。

关键词: 遥感和传感器, 辐射定标, 深对流云, 先进的静止轨道辐射成像仪, 角度分布模型, 表观反射率, 反射太阳波段

中图分类号: TP732/P2

引用格式: 张北, 胡秀清, 周为伟, 沙金, 陈林. 2025. FY-4A/AGRI 反射波段的深对流云辐射定标. 遥感学报, 29(7): 2345–2355

Zhang B, Hu X Q, Zhou W W, Sha J and Chen L. 2025. Radiometric calibration method for deep convective clouds in the reflective bands of FY-4A/AGRI. National Remote Sensing Bulletin, 29(7): 2345–2355 [DOI: 10.11834/jrs.20243528]

1 引言

风云四号 A 星 (FY-4A) 是中国第二代静止轨道系列气象卫星的首发星, 于 2016 年 12 月 11 日成功发射, 目前已在轨运行超过 6 年。FY-4A 搭载了一台先进的静止轨道辐射成像仪 AGRI (Advanced Geostationary Radiation Imager), 可实现分钟级区域扫描成像。FY-4A/AGRI 遥感数据在天气系统预报、生态环境监测、农林水利等领域发挥着重要作用 (Yang, 2017)。高精度辐射定标是定量遥感应用的基础, 而仪器在轨运行期间不可避免受到

太阳辐照、空间粒子侵蚀和器件老化等因素影响, 其辐射性能会出现衰减, 直接影响遥感数据质量和定量产品的应用效益。因此, 长期跟踪监测星载仪器的在轨辐射性能并进行相应的定标更新, 是确保遥感应用质量不可或缺的环节 (Zhang 等, 2019; 杨敏 等, 2021; 李秀举 等, 2022)。然而, FY-4A/AGRI 现有的反射波段星上定标设备和定标算法精度有待提升, 需要采用多种在轨替代定标方法开展辐射响应跟踪和衰减校正。

深对流云 DCC (Deep Convective Cloud) 是对流旺盛、顶部极冷且在可见光波段非常明亮的稳

收稿日期: 2023-12-13; 预印本: 2024-08-21

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2022YFB3902901)

第一作者简介: 张北, 研究方向为传感器辐射定标的理论和应用。E-mail: kevincol22@aliyun.com

通信作者简介: 胡秀清, 研究方向为卫星遥感器辐射定标、遥感数据预处理及质量提升、遥感反演科学算法与遥感大数据应用等。

E-mail: huxq@cma.cn

定目标。DCC在可见光VIS (Visible)、近红外NIR (Near Infrared) 和短波红外SWIR (Short-wave Infrared) 光谱平坦, 具有稳定的反射率、接近于朗伯体(Lambertian) 各向同性特点, 并且DCC上方的水汽和气溶胶含量极少(Chen等, 2013)。近年来, 国内外学者广泛使用基于DCC目标的在轨替代定标方法对卫星光学传感器进行辐射性能跟踪评估。Hu等(2004)最早根据红外亮温BT (Brightness Temperature) 阈值和云光学厚度识别DCC目标, 通过跟踪DCC月度反照率的变化评估多种星载仪器辐射性能的稳定性(Hu等, 2004)。Doelling等(2004)首次使用DCC定标方法评估了第一代NOAA卫星高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)的辐射性能退化。Wang等(2022)基于DCC目标对NPP和VIIRS传感器进行了10年长时间序列的辐射响应评估, 证明了DCC定标方法的可靠性。周为伟等(2023)基于日本葵花8号(Himawari-8)成像仪在不同观测角度区间的平均反射率来表征DCC双向反射分布函数BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 特性并进行建模, 在短波红外通道取得了较好的各向异性校正效果。然而, DCC定标跟踪方法依赖于大样本统计分析, 但在先前的研究中对该方法可能受到的影响因素缺乏系统性分析, 这些因素会对定标精度和稳定性产生不可忽视的影响。因此, 本文重点研究DCC定标跟踪方法中红外亮温阈值、DCC像元邻域空间均一性和DCC反射率角度分布模型ADM (Angle Distribution Model) 等主要影响因素的敏感性, 根据分析结果建立最优方案, 并采用优化后方法定量评估FY-4A/AGRI反射波段辐射性能变化。

2 研究仪器与方法

2.1 FY-4A/AGRI

FY-4A/AGRI是一种星载多通道辐射成像仪, 具有精密设计的双扫描镜机构, 能够实现精确的二维指向和分钟级快速扫描。AGRI的观测数据应用于数值天气预报模式、卫星辐射资料同化、气候变化研究、大气温湿度廓线以及云、大气痕量、气体成分等研究方向。FY-4A/AGRI具有14个光谱通道: 3个可见光/近红外通道, 3个短波红外通道, 2个中波红外通道, 2个水汽通道和4个长波

红外通道(Yang等, 2017), 具体指标见表1。

表1 FY-4A/AGRI光谱波段指标

Table 1 FY-4A/AGRI spectral bands specifications			
波段	中心波长/ μm	带宽/ μm	灵敏度和信噪比
1	0.470	0.45—0.49	$S/N \geq 90, \rho = 100\%$
2	0.650	0.55—0.75	$S/N \geq 200, \rho = 100\%$
3	0.825	0.75—0.90	$S/N \geq 200, \rho = 100\%$
4	1.375	1.36—1.39	$S/N \geq 90, \rho = 100\%$
5	1.61	1.58—1.64	$S/N \geq 200, \rho = 100\%$
6	2.25	2.10—2.35	$S/N \geq 200, \rho = 100\%$
7	3.75	3.50—4.00 (High)	$NE\Delta T \leq 0.7\text{ K}$
8	3.75	3.50—4.00 (Low)	$NE\Delta T \leq 0.2\text{ K}$
9	6.25	5.80—6.70	$NE\Delta T \leq 0.3\text{ K}$
10	7.10	6.9—7.3	$NE\Delta T \leq 0.3\text{ K}$
11	8.50	8.0—9.0	$NE\Delta T \leq 0.2\text{ K}$
12	10.8	10.3—11.3	$NE\Delta T \leq 0.2\text{ K}$
13	12.0	11.5—12.5	$NE\Delta T \leq 0.2\text{ K}$
14	13.5	13.2—13.8	$NE\Delta T \leq 0.5\text{ K}$

注: 表中S/N为信号功率与噪声功率的比值, ρ 为反射率, NE ΔT 为噪声等效温差。

2.2 DCC定标跟踪方法

基础DCC定标跟踪方法的步骤是: 首先从FY-4A/AGRI观测数据中提取出DCC目标像元, 然后计算目标像元的反射率并使用ADM进行各向异性校正, 最后构建每日或每月的DCC反射率概率密度函数PDF (Probability Density Function) 并跟踪其特征值的变化来监测和评估FY-4A/AGRI仪器辐射响应性能。

DCC定标跟踪方法的关键是准确地识别DCC目标像元。在卫星观测下, 深对流云团具有高冷且明亮云顶的显著特征。在国内外的相关研究中通常使用红外窗区通道亮温初步识别DCC像元(Wang等, 2022; 周为伟等, 2023)。首先选取纬度 $<20^\circ$ 的热带地区数据, 通过AGRI红外窗区通道亮温阈值来初步识别DCC目标像元。接着, 通过像元邻域空间均一性筛选出处于对流发展核心区域的稳定DCC像元, 避免边缘区域和快速变化地不稳定对流单体的影响。分别计算初步识别到的DCC像元和其相邻 3×3 区域像元的反射率和亮温标准差, 筛选出同时满足可见光 $0.65\text{ }\mu\text{m}$ 通道反射率标准差 $<3\%$ 和红外 $10.8\text{ }\mu\text{m}$ 通道亮温标准差 $<1\text{ K}$ 的DCC像元。最后, 限制像元的太阳天顶角SZA (Solar Zenith Angle) 和观测天顶角VZA (View Zenith Angle) 在 40° 以内。DCC目标像元的识别过程见图1。所有热带地区有效像元的红外通道亮温

值和反射率PDF见图1(a); 红外通道亮温<205 K的潜在DCC像元见图1(b); 经过视场角度和空间均一性阈值筛选后的DCC像元见图1(c)。图1中包含了DCC像元数量, 反射率标准差、均值和众数。

当应用严格的视场角度和空间均一性阈值对潜在DCC像元进一步筛选后, 得到的DCC像元集合反射率PDF曲线更平滑, 并且反射率标准差从10.44%减小到6.23%。

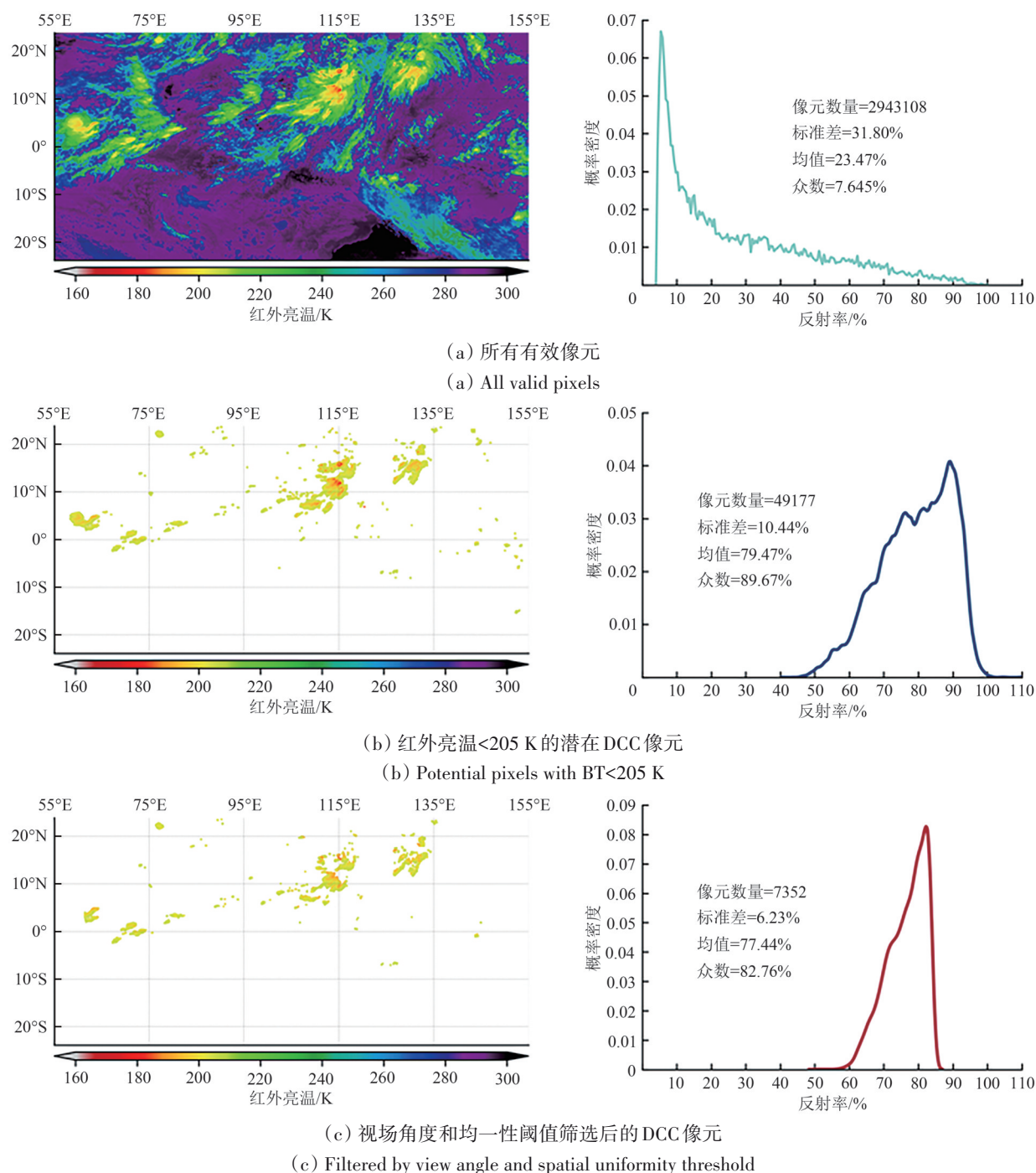


图1 DCC目标像元的识别过程

Fig. 1 The identification process of DCC target pixels

为了校正不同观测角度引起的反射率偏差, 使用DCC角度分布模型ADM (Angular Distribution Model) 进行各向异性校正。经ADM校正后的DCC表观反射率计算公式如下:

$$R_i = \frac{R_i^*}{D^2 \times \cos(sza) \times ADM(sza, vza, raa)} \quad (1)$$

式中, R_i 为AGRI第*i*通道经ADM校正后的DCC表观反射率, D 为日地距离修正因子, R_i^* 为根据

AGRI第*i*通道业务定标系数和数码值DN (Digital Number) 计算得到的反射率, $ADM(sza, vza, raa)$ 为各向异性校正因子, 对应一组太阳天顶角 (*sza*)、观测天顶角 (*vza*) 和相对方位角 (*raa*)。

最后, 构建日度或月度DCC反射率PDF, 通过跟踪长时间序列PDF峰值反射率或反射率均值的变化来评估仪器辐射响应性能。选择较短时间的数据构建DCC反射率PDF会导致DCC样本数量减少, 增加反射率均值或PDF峰值反射率时间序列的不稳定性, 但是可以捕捉到短时间内的仪器辐射响应变化。相反地, 选择较长时间的数据可以提供大量的DCC样本, 使反射率均值或PDF峰值反射率时间序列更稳定, 但是无法监测短时变化。因此, 应根据实际需求选择适当的时间尺度。若需关注短时期的仪器辐射响应变化, 建议采用

每日数据构建DCC像元集合; 若更关注长时期的变化趋势, 则建议采用月度数据构建DCC像元集合, 或者使用每日数据构建DCC像元集合, 再通过对多天数据的平均来平滑反射率变化趋势曲线, 从而获得更为稳定和准确的长期变化信息。

图2(a)和(b)分别比较了2020年10月—2023年4月可见光0.65 μm 通道和短波红外1.37 μm 通道在不同月份的DCC反射率, 以及对应的反射率均值 (Mean) 和峰值反射率 (Mode)。由图2(a)可见: 0.65 μm 通道月度反射率PDF曲线逐月向左偏移, DCC反射率均值和峰值反射率减小了约11.12%; 由图2(b)可见: 1.37 μm 通道的不同月度DCC反射率PDF曲线几乎重合, 反射率均值和峰值反射率的标准偏差非常小, 分别为0.34%和0.36%。

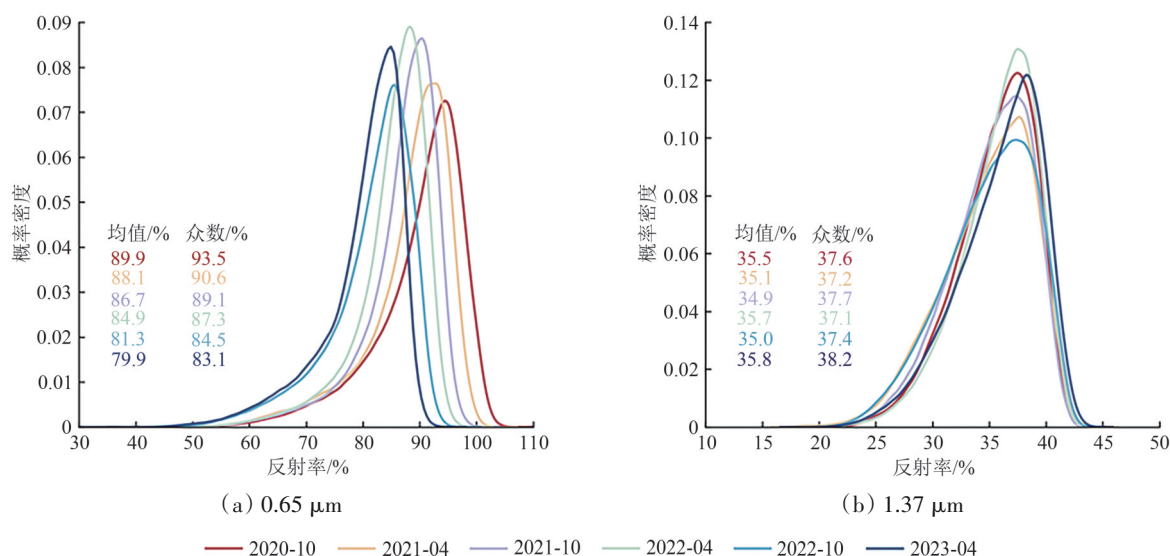


图2 不同通道随年月的DCC反射率对比

Fig. 2 DCC reflectance PDFs for different months

3 敏感性分析

在DCC像元识别和反射率校正过程中, 红外通道亮温阈值、DCC像元邻域空间均一性条件和DCC反射率角度分布模型等不确定性因素将会在传感器自身辐射性能变化的基础上增加噪声, 影响评估结果的准确性和稳定性。本文对这些影响DCC定标结果的因素逐一进行敏感性分析, 并依据结果对DCC模型进行订正, 建立最优方案, 达到提高DCC定标方法精度和稳定性的目的。

3.1 红外亮温阈值

红外通道亮温阈值是识别DCC像元的关键的

影响因素。图3以2021年5月的数据为例, 展示了不同红外亮温BT (Brightness Temperature) 阈值下的0.65 μm 通道DCC反射率PDF。由图3(a)可见: 红外亮温阈值在205—190 K, 以5 K幅度递减; 红外亮温阈值每降低5 K, 0.65 μm 通道DCC反射率均值 (MEAN) 和峰值反射率 (MODE) 分别增加约1.9%和1.1%。然而, 严格的红外亮温阈值显著减少了DCC像元数量, 当亮温阈值从205 K分别降低到200和195 K时, DCC像元数量分别减少到44%和12%; 当亮温阈值为190 K时, DCC像元样本数量急剧减少到1.3%, 导致峰值反射率不明确, PDF曲线出现双峰特征, 影响了定标跟踪

的可靠性。

设置红外亮温阈值在 195—205 K 间以 2 K 为一个区间, 图 3 (b) 和 3 (c) 分别展示了 0.65 μm 通道和 1.61 μm 通道 DCC 反射率在不同红外亮温区间的 PDF 曲线。可见光和短波红外通道的 DCC 反射率 PDF 曲线具有不同的形态特征: 0.65 μm 通道反

射率 PDF 呈现左侧拖尾的负偏态高斯分布, 反射率均值 (MEAN) 小于峰值反射率 (MODE), 反射率均值的变异系数 CV (Coefficient of Variation) 大于峰值反射率。而 1.61 μm 通道则呈现近似正态高斯分布, 反射均值约等于峰值反射率, 反射率均值的变异系数 (CV) 略小于峰值反射率。

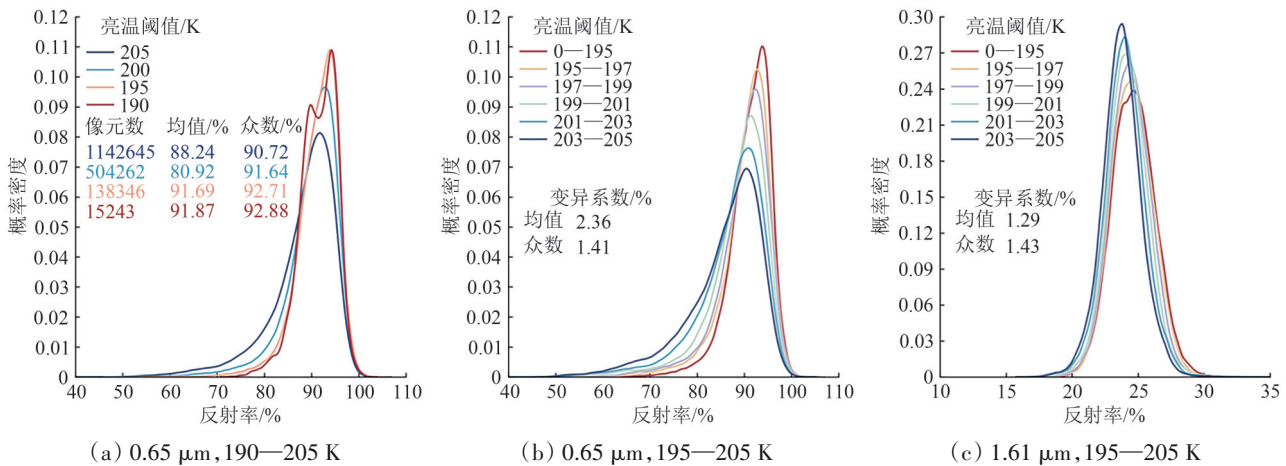


图 3 不同红外亮温阈值下的 DCC 反射率 PDF

Fig. 3 DCC reflectance PDFs under different infrared brightness temperature thresholds

为了进一步研究不同波段 DCC 反射率均值和 PDF 峰值反射率对红外亮温阈值的敏感性, 以 1 K 为间隔, 将红外亮温阈值从 195—205 K 划分为 10 个区间。图 4 (a) 和图 4 (b) 分别展示了 0.65 μm 通道和 1.61 μm 通道在每个阈值区间内的 DCC 反射率均值 (Mean) 和 PDF 峰值反射率 (Mode) 以及 DCC 像元样本数量 (DCC Pixels) 的变化趋势。随着红外亮温阈值的增大, DCC 像元样本数量随之增加, 而两个通道 DCC 反射率均值和 PDF 峰值反射率都随之降低。在 0.65 μm 通道, DCC 反射率均值在 195 K 和 205 K 间的总偏移量 (Drift) 为 4.759%,

PDF 峰值反射率的总偏移量较小, 为 2.518%。PDF 峰值反射率对于红外亮温阈值的敏感性更低, 约为反射率均值的 52%。不同的是, 在 1.61 μm 通道, DCC 反射率均值在 195 K 和 205 K 间的总偏移量 (Drift) 为 5.122%, PDF 峰值反射率的总偏移量为 6.276%。DCC 反射率均值对于红外亮温阈值的敏感性略低, 约为 PDF 峰值反射率的 81%。因此, 在可见光/近红外波段选用对红外亮温敏感性较低的 PDF 峰值反射率, 在短波红外波段选用对红外亮温敏感性较低的反射率均值是最优方案。

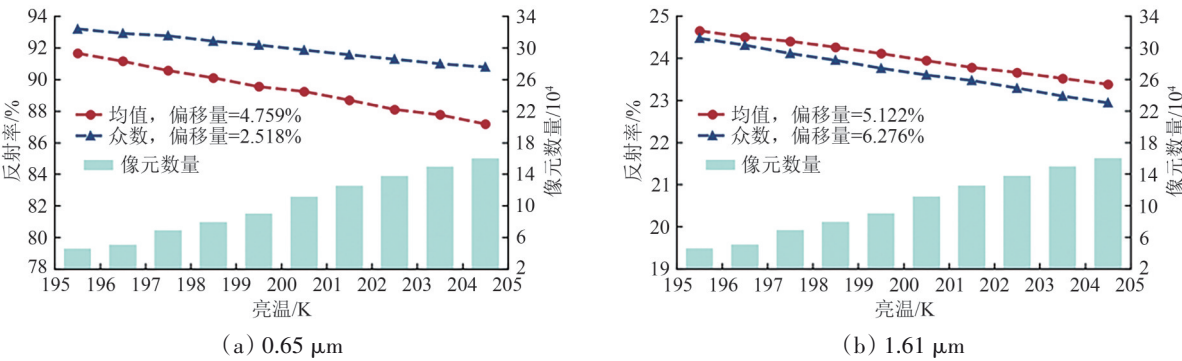


图 4 DCC 反射率均值和 PDF 峰值反射率对红外亮温阈值的敏感性

Fig. 4 Sensitivity of DCC reflectance mean and PDF peak reflectance to infrared brightness temperature threshold

红外亮温阈值是DCC像元识别方法的首要因素,因此待评估仪器的红外通道定标精度是DCC定标方法的一个重要不确定性来源。FY-4A/AGRI携带了面源黑体作为红外通道在轨辐射定标基准,通过南北扫描镜转动指向黑体,得到红外各通道黑体观测数据(陈博洋等,2018),其热辐射通道设计指标要求定标精度优于1 K。图4展示的研究结果表明DCC反射率的偏移量与红外亮温阈值基本呈线性变化关系,将DCC反射率在195—205 K间的总偏移量(Drift)除以10,即得到近似的红外亮温阈值每1 K波动引起的DCC反射率的不确定性范围。对于0.65 μm 通道,亮温阈值每增加1 K,DCC反射率均值(PDF峰值反射率)随之降低约0.4759% (0.2518%)。对于1.61 μm 通道,红外亮温阈值每增加1 K,DCC反射率均值(PDF峰值反射率)随之降低约0.5122% (0.6276%)。因此,FY-4A/AGRI红外通道定标精度对于DCC反射率的不确定性影响范围约为0.25%—0.63%。

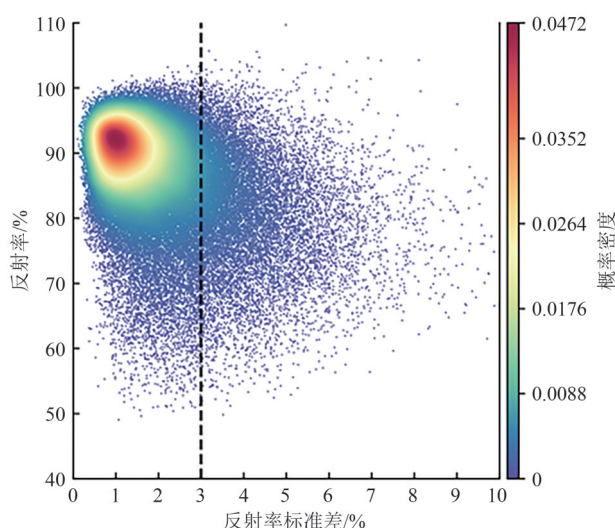
3.2 像元邻域空间均一性

在红外亮温阈值条件的基础上,计算相邻像元间的可见光通道反射率标准差和红外通道亮温标准差,筛选出处于对流发展核心区域的DCC像元,提高DCC像元识别的准确性以及DCC反射率的稳定性(陈林等,2016)。以2021年5月的FY-4A/AGRI观测数据为例,分别研究3 $\times$ 3区域相邻像元和7 $\times$ 7区域相邻像元条件下,可见光0.65 μm 通道反射率标准差和红外通道亮温标准差阈值条件对

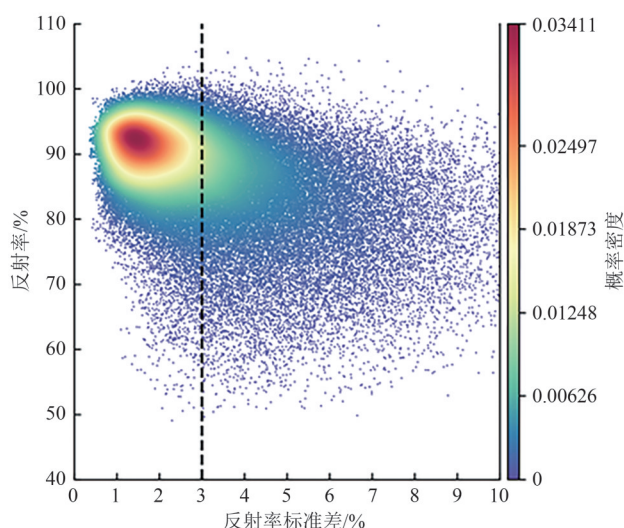
DCC反射率的影响。

图5展示了不同DCC像元邻域空间均一性条件下的0.65 μm 通道DCC反射率分布图。图5中纵坐标为0.65 μm 通道DCC像元反射率值,色带表示该反射率值出现的概率密度,黑色虚线为设定的阈值标准。图5(a)和图5(b)的横坐标分别为相邻3 $\times$ 3区域和7 $\times$ 7区域的0.65 μm 通道反射率标准差。可以看到,绝大多数DCC像元反射率标准差在3%以内,反射率值在0.8—1.0。而部分反射率值在0.5—0.8的低反射率像元与图3(b)中反射率PDF曲线在左侧低值区的拖尾相对应。并且,与3 $\times$ 3区域相比,7 $\times$ 7区域反射率标准差<3%阈值条件下低反射率像元数更少,DCC反射率值分布更为稳定集中。图5(c)和图5(d)的横坐标分别为相邻3 $\times$ 3区域和7 $\times$ 7区域红外通道亮温标准差。当红外亮温标准差阈值设置为1 K时,3 $\times$ 3区域条件下的DCC像元数量占比约65%,而7 $\times$ 7区域条件下的DCC像元数量占比仅约12%,过少的DCC像元样本数量可能不能准确反应DCC像元集合的反射率特征。

增加相邻空间像元数量能够提高识别核心区域DCC目标的准确性,但是过于严格的阈值条件会显著减少DCC像元样本数量,从而影响DCC反射率PDF特征值的稳定性。根据本节的结果,建议选择同时满足相邻7 $\times$ 7区域像元反射率标准差<3%和3 $\times$ 3区域像元红外亮温标准差<1 K的DCC像元。



(a) 3 $\times$ 3区域反射率标准差
(a) Standard deviation of reflectance in 3 $\times$ 3 grids



(b) 7 $\times$ 7区域反射率标准差
(b) Standard deviation of reflectance in 7 $\times$ 7 grids

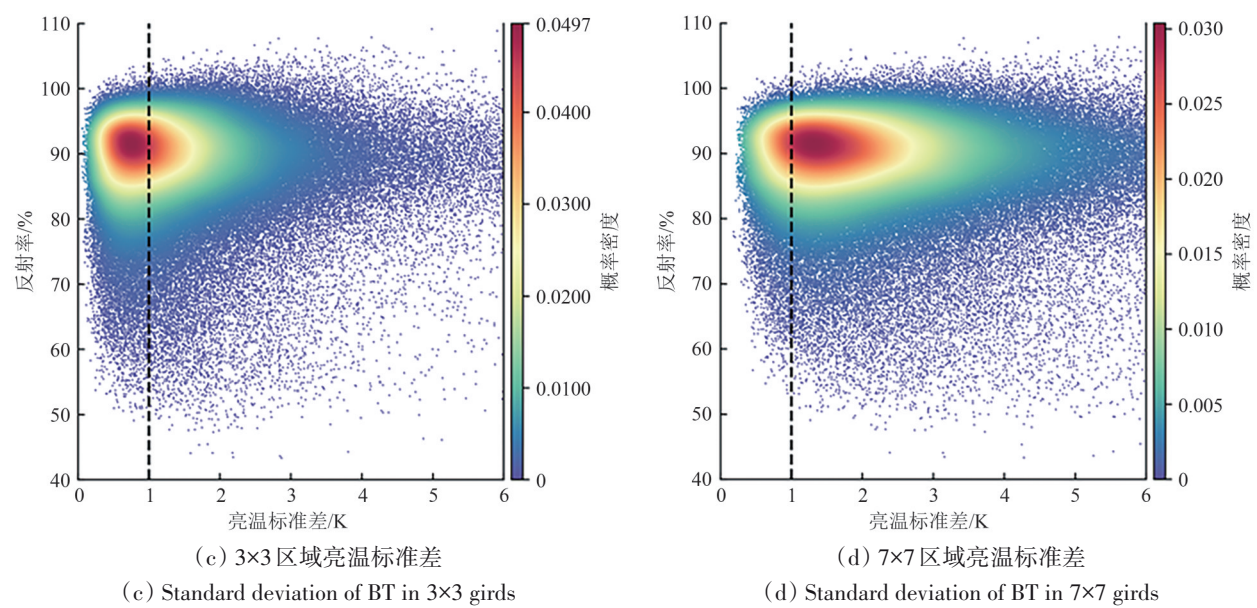


图 5 不同像元邻域空间均一性条件下的 0.65 μm 通道 DCC 反射率分布图

Fig. 5 Scatter density plots of 0.65 μm channel DCC reflectance under different pixel homogeneity conditions brightness temperature

3.3 反射率角度分布模型

DCC 并不是完美的朗伯体，目前普遍使用 Hu 或者 CERES 厚冰云角度分布模型 (ADM) 对 DCC 像元反射率进行各向异性校正。Hu 等 (2004) 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 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 >99.9% 且云光学厚度 >50 的厚冰云 ADM。这两种深对流云 ADM 使用不同仪器和不同时期的观测数据作为输入条件进行建模，因此对特定传感器的 DCC 反射率各向异性校正效果也会有所不同。

为了直观地评估两种 DCC ADM 的校正效果，以 2022 年 10 月的观测数据为例，将 DCC 像元以太阳天顶角 (SZA) 10° 为一个区间进行分组，建立了不同太阳天顶角 (SZA) 角度区间下的 DCC 反射率概率密度函数 (PDF)。首先假设 DCC 是完美的朗伯体或者 ADM 能够完全地校正各向异性，反射率不受观测几何角度的影响，可以推断出这些随太阳天顶角变化的反射率 PDF 都是完全相同的。图 6 展示了不同太阳天顶角度区间下的 0.65 μm 通道 DCC 反射率 PDF 曲线。如图 6 (a) 所示，即使不使用 ADM 校正，4 个 SZA 角度区间的反射率均值 (Mean) 和峰值反射率 (Mode) 的标准差 (STD) 都 <3%，证明了 DCC 的近似朗伯体特性。同时，随着太阳天顶角的增大，DCC 反射率 PDF 曲线逐渐向左偏移，表明在高观测几何角度的情况下，

需要使用 ADM 对 DCC 反射率进行各向异性校正。图 6 (b) 和 (c) 分别展示了 Hu ADM 和 CERES ADM 校正后的 DCC 反射率 PDF 曲线，可以直观的看出 CERES ADM 模型的校正效果更为显著。经 CERES ADM 模型校正后，4 个 SZA 角度区间的反射率 PDF 曲线几乎重合，反射率均值和峰值反射率的标准差分别从 2.577% 和 2.858% 减小至 0.4128% 和 0.4398%，明显优于 Hu ADM 模型校正后的结果。

表 2 为 FY-4A/AGRI 6 个反射通道在两种 ADM 校正前后，不同 SZA 角度区间 DCC 反射率均值/PDF 峰值反射率的标准差。可见：在可见光和近红外波段使用 CERES ADM 校正后，不同 SZA 角度区间的 DCC 反射率均值和 PDF 峰值反射率的标准差最小，校正效果优于 Hu ADM。但是这两种 ADM 在 3 个短波红外通道均无明显校正效果，甚至增大了反射率均值和 PDF 峰值反射率的标准差。因此，对于 FY-4A/AGRI 仪器，在可见光和近红外波段选择 CERES ADM 作为 DCC 反射率各向异性校正的最优方案。

4 结果与讨论

使用优化后的 DCC 定标跟踪方法对 2017 年 3 月—2023 年 4 月 FY-4A/AGRI 反射波段辐射性能变化进行定量评估。首先选择热带地区 (纬度 < 20°) 的观测数据，使用红外通道亮温阈值初步识别 DCC 像元。接着筛选出同时满足相邻 7×7 区域

像元反射率标准差<3%和3×3区域像元红外亮温标准差<1 K的DCC核心区域像元。然后，对VIS/NIR通道使用CERES ADM对DCC反射率进行各向异性校正。最后，通过跟踪每日DCC反射率均值

(SWIR波段)和PDF峰值反射率(VIS/NIR波段)的变化来监测仪器辐射性能，并采用滑动平均的方法平滑趋势曲线。

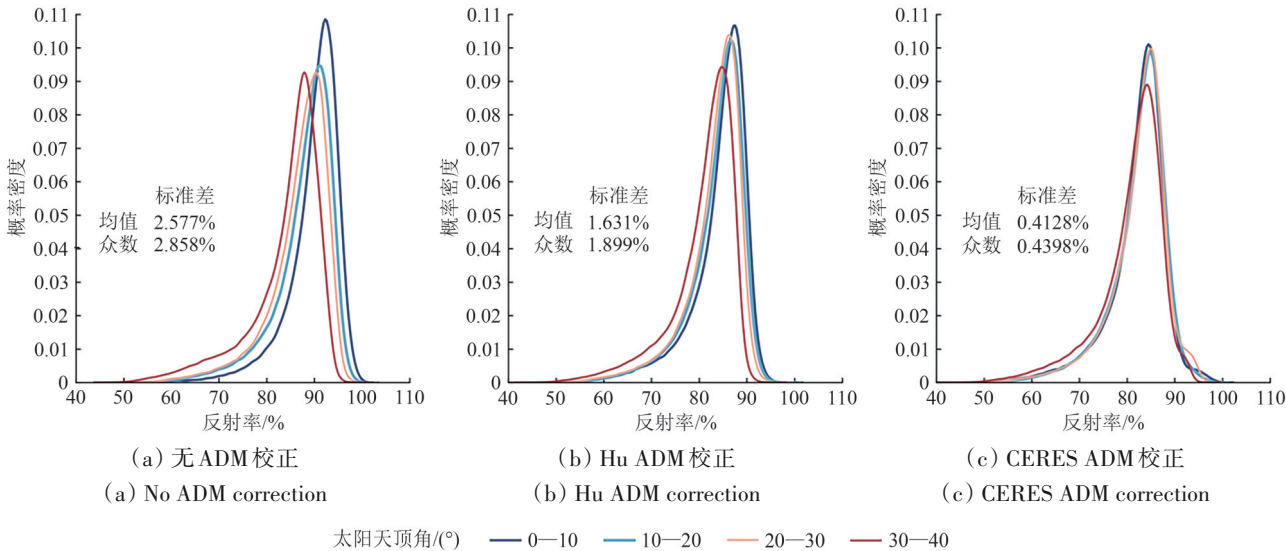


图6 不同SZA角度区间下的0.65 μm通道DCC反射率PDF曲线对比
Fig. 6 DCC reflectance PDF curves for different VZA intervals in 0.65 μm

表 2 不同SZA角度区间DCC反射率均值/PDF峰值
反射率的标准差

Table 2 Standard deviation of PDF reflectance mean/mode in different SZA range			
中心波长/μm	无 ADM 模型 校正/%	Hu 模型 校正后/%	CERES 模型 校正后/%
0.470	2.49/2.23	1.52/1.34	0.413/0.406
0.650	2.86/2.58	1.90/1.63	0.440/0.413
0.825	2.33/1.99	1.44/1.13	0.366/0.338
1.375	1.58/1.68	1.74/1.63	1.820/1.930
1.610	1.48/1.49	1.58/1.60	1.400/1.430
2.250	1.46/1.59	1.43/1.54	1.420/1.510

图7展示了2017年3月—2023年4月，FY-4A/AGRI反射波段DCC日反射率变化趋势。图中横坐标表示日期，纵坐标表示归一化到第一天的DCC日反射率，图7(a)和图7(b)中虚线分别表示VIS/NIR和SWIR波段DCC反射率变化的拟合曲线，其中采用二次函数拟合可见光—近红外波段，采用线性函数拟合短波红外波段。FY-4A/AGRI反射波段辐射性能总变化率和年平均变化率分别见式(2)和式(3)。具体计算如下：

$$D_{total,i} = \frac{\bar{R}_{DCC,i}(d_1) - \bar{R}_{DCC,i}(d_n)}{\bar{R}_{DCC,i}(d_1)} \times 100\% \tag{2}$$

$$D_{annual,i} = \frac{D_{total}}{d_n - d_1} \times 365 \times 100\% \tag{3}$$

式中， i 表示FY-4A/AGRI第 i 通道， d_1 表示数据时间序列的第一天； d_n 表示最后一天； $\bar{R}_{DCC,i}$ 表示DCC反射率二次项函数拟合值的30d滑动平均值； $D_{total,i}$ 表示总变化率， $D_{annual,i}$ 表示年平均变化率，正值表示该通道辐射响应衰减，负值表示辐射响应增强。定义波动性指标 δ 来描述反射率观测值与拟合值之间的离散程度， δ 的计算如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{d_i=1}^n \left(\frac{R(d_i) - \tilde{R}(d_i)}{\tilde{R}(d_i) - (R(d_i) - \tilde{R}(d_i))/\tilde{R}(d_i)} \right)^2} \tag{4}$$

式中， d_i 表示第 i 天， $R(d_i)$ 表示第 i 天的DCC反射率观测值， $\tilde{R}(d_i)$ 表示第 i 天DCC反射率的拟合值，波动性指标越小则仪器辐射性能就越稳定。表3列出了根据上述公式计算的FY-4A/AGRI反射波段辐射性能衰减评估结果，包括总衰减、年变化率和波动性指标(δ)。

由图7和表3可见：(1)可见光0.47 μm和0.65 μm通道辐射性能衰减显著，2017年3月—2023年4月间总衰减率分别达到45.55%和26.62%，并且0.47 μm通道DCC反射率波动性指标最高，为

2.149%。(2) 从拟合曲线可以看出, 0.47 μm 蓝光通道的辐射性能衰减率随时间推移逐渐减小; 0.65 μm 通道辐射性能基本呈线性衰减趋势; 自 2017 年 3 月始, 近红外 0.825 μm 通道的辐射性能逐步升高, 截至 2020 年 6 月后开始逐渐衰减。(3) VIS/NIR 在较短的时间尺度上表现出由 DCC 样本数量、仪器噪声等因素引起的随机性波动。为减小这种随机性噪声的影响, 在研究中使用了反射率的拟合值来定量计算仪器的辐射响应变化。

(4) 短波红外波段 1.37 μm 卷云通道的辐射性能衰减最小, 总衰减率为 0.5648%。在卫星发射初期 2017 年 3 月—2018 年 3 月的一年时间内, 该通道约有 5% 的明显衰减。然后, 从 2018 年 3 月—2023 年 4 月的 5 年时间内辐射性能保持稳定, 几乎没有衰减。(5) 1.61 μm 通道和 2.25 μm 通道呈线性衰减趋势, 总衰减率分别为 2.193% 和 6.362%; 1.61 μm 和 2.25 μm 通道的 DCC 反射率具有近似相同的波动周期。

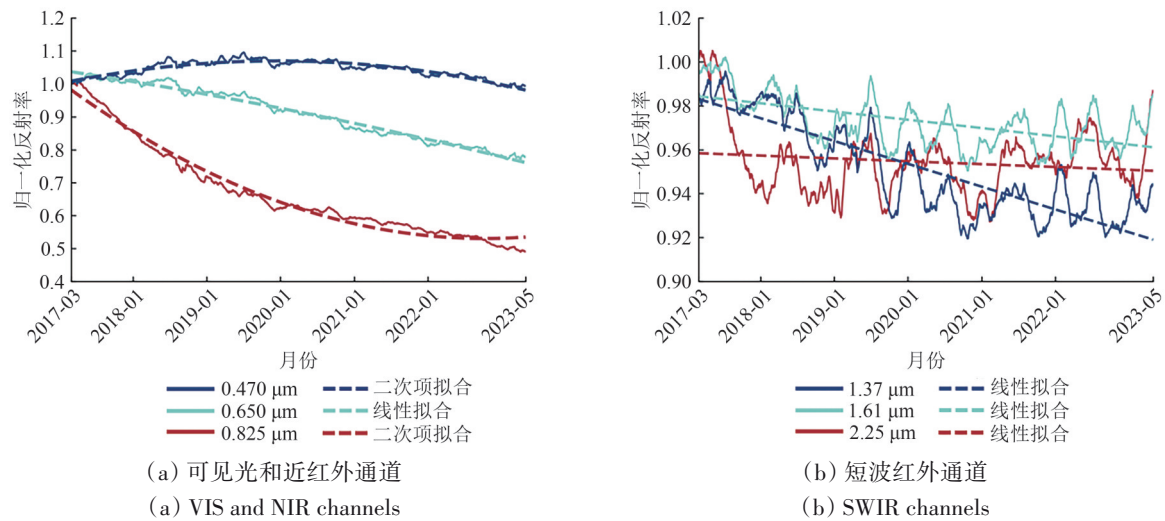


图 7 2017 年 3 月—2023 年 4 月, FY-4A/AGRI 反射波段 DCC 日反射率变化趋势
Fig. 7 Trend of DCC reflectance variation in FY-4A/AGRI reflective bands from March 2017 to April 2023

表 3 2017 年 3 月—2023 年 4 月 FY-4A/AGRI 反射波段辐射性能衰减评估结果

Table 3 Radiometric degradation results of FY-4A/AGRI reflective bands from March 2017 to April 2023

中心波长/ μm	总衰减/%	年衰减/%	波动性指标/%
0.470	45.5500	7.3830	2.1490
0.650	26.6200	4.3150	1.1410
0.865	2.6620	0.4314	0.9366
1.375	0.5648	0.0915	1.6730
1.610	2.1930	0.3556	1.1270
2.250	6.3620	1.0310	1.2890

5 结 论

本研究对基于深对流云 (DCC) 的卫星光学传感器辐射定标跟踪方法中影响精度和稳定性的关键因素进行了敏感性研究, 建立其最优方案; 并采用优化方法定量评估了 FY-4A/AGRI 反射波段的辐射响应性能变化。主要结论如下:

- (1) 不同波段 DCC 反射率的红外亮温敏感性存在差异。在可见光/近红外波段选用敏感性较低的 PDF 峰值反射率, 在短波红外波段选用敏感性较低的反射率均值为最优方案。
- (2) 过于严格的像元邻域空间均一性阈值会显著减少 DCC 像元样本数量, 导致定标精度和稳定性下降。选择满足相邻 7×7 区域像元反射率标准差 <3% 和 3×3 区域像元红外亮温标准差 <1 K 的 DCC 像元为最优方案。
- (3) CERES DCC 角度分布模型在可见光/近红外波段, 的各向异性校正效果明显优于 Hu 模型; 但这 2 种 DCC 角度分布模型在短波红外波段都没有明显校正效果。
- (4) 2017 年 3 月—2023 年 4 月, FY-4A/AGRI 反可见光波段衰减严重, 0.47 μm 通道衰减率达 45.55%。短波红外 1.37 μm 通道在初期衰减明显, 之后趋于稳定; 1.61 μm 和 2.25 μm 通道呈线性衰减趋势, 且具有相近的波动周期。

本研究建立的最优方案有效提升了 FY-4A/AGRI 反射波段深对流云辐射衰减评估方法的精度和稳定性, 评估结果为该仪器反射通道的业务定标更新提供了参考依据。

参考文献(References)

- Chen B Y, Wu Q, Feng X, Guo Q and Wei C Y. 2018. On-orbit test to FY-4A AGRI and generating RGB image. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 37(4): 411-415 (陈博洋, 吴琼, 冯绚, 郭强, 魏彩英. 2018. FY-4A 多通道扫描辐射成像仪评价与图像合成. *红外与毫米波学报*, 37(4): 411-415) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2018.04.006]
- Chen L, Hu X Q, Xu N and Zhang P. 2013. 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). *Remote Sensing*, 5(12): 6958-6975 [DOI: 10.3390/rs5126958]
- Chen L, Xu N, Hu X Q, Lu F and Zhang P. 2016. Study on orbit radiometric calibration for FY-2 visible band based on deep convective cloud. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 36(8): 2639-2645 (陈林, 徐娜, 胡秀清, 陆风, 张鹏. 2016. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标. *光谱学与光谱分析*, 36(8): 2639-2645) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)08-2639-07]
- Doelling D R, Nguyen L and Minnis P. 2004. On the use of deep convective clouds to calibrate AVHRR data//*Proceedings of SPIE* 5542, *Earth Observing Systems IX*. Denver: SPIE: 281-289 [DOI: 10.1117/12.560047]
- Hu Y X, Wielicki B A, Yang P, Stackhouse P W, Lin B and Young D F. 2004. 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. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2594-2599 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.834765]
- Li X J, Wang B Y, Wu Y P, Han C P, Cao Q, Zhou S T, Wang W C and Li P P. 2022. Study on the improvement of scan mirror thermal radiation correction on the calibration accuracy of FY-4A AGRI. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 41(3): 608-617 (李秀举, 王保勇, 吴亚鹏, 韩昌佩, 曹琦, 周树添, 王伟成, 李盼盼. 2022. 扫描镜热辐射校正对 FY-4A 星 AGRI 定标精度的提升研究. *红外与毫米波学报*, 41(3): 608-617) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2022.03.012]
- Wang W H, Cao C Y, Shao X, Blonski S, Choi T, Upreti S, Zhang B and Bai Y. 2022. Evaluation of 10-year NOAA/NASA Suomi NPP and NOAA-20 VIIRS reflective solar band (RSB) sensor data records (SDR) over deep convective clouds. *Remote Sensing*, 14(15): 3566 [DOI: 10.3390/rs14153566]
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, Lu F and Guo Q. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8): 1637-1658 [DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0065.1]
- Yang M, Liu Z Y, Zhao Y G, MA L L, Li W, Wang N, Li C R and Tang L L. 2021. On-orbit radiometric calibration method for satellites based on TOA reflectance at Baotou site. *Acta Optica Sinica*, 41(18): 1828001 (杨敏, 刘照言, 赵永光, 马灵玲, 李婉, 王宁, 李传荣, 唐伶俐. 2021. 基于包头场 TOA 反射率的卫星在轨辐射定标方法. *光学学报*, 41(18): 1828001) [DOI: 10.3788/AOS202141.1828001]
- Zhang P, Zhu L, Tang S H, Gao L, Chen L, Zheng W, Han X Z, Chen J and Shao J L. 2019. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications. *Frontiers in Earth Science*, 6: 224 [DOI: 10.3389/feart.2018.00224]
- Zhou W W, Hu X Q and Yang L K. 2023. Modeling of BRDF characteristics of deep convective cloud based on Himawari-8 satellite. *Acta Optica Sinica*, 43(12): 1228007 (周为伟, 胡秀清, 杨磊库. 2023. 基于 Himawari-8 卫星成像仪的深对流云 BRDF 特性建模. *光学学报*, 43(12): 1228007) [DOI: 10.3788/AOS221771]

Radiometric calibration method for deep convective clouds in the reflective bands of FY-4A/AGRI

ZHANG Bei^{1,2}, HU Xiuqing^{1,2}, ZHOU Weiwei^{1,3}, SHA Jin⁴, CHEN Lin^{1,2}

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

2. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Beijing 100081, China;

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

4. College of Astronautics Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: The advanced geostationary orbit radiometer (AGRI) of FY-4A satellite has been on orbit for 6 years, and the radiation performance of some reflective channels have significantly degraded, affecting the accuracy of quantitative remote sensing product applications. On-orbit vicarious calibration methods based on Deep Convective Cloud (DCC) targets can track and correct the radiometric

response of spaceborne optical sensors for attenuation. This method relies on large-sample statistical analysis, and conducting sensitivity studies on factors influencing the calibration accuracy and stability in this method and developing optimal solutions holds significant importance.

The procedure of the fundamental DCC calibration and tracking method is outlined as follows. Initially, DCC target pixels were extracted from FY-4A/AGRI L1 level data, the reflectance of the target pixels was calculated, and anisotropic correction was executed using the DCC Angle Distribution Model (ADM). Subsequently, daily or monthly Probability Density Functions (PDFs) of DCC reflectance were constructed, and the trend in peak reflectance (also known as mode) or reflectance mean was tracked to monitor and evaluate the radiometric performance of the FY-4A/AGRI instrument. To improve the calibration accuracy and stability, the sensitivity research scheme for infrared brightness temperature threshold, pixel uniformity conditions, and DCC ADM was proposed. Lastly, the DCC model was corrected, and an optimal solution was established according to the sensitivity analysis results.

Results indicate that for the infrared brightness temperature threshold, the sensitivity of DCC mean reflectance is lower than that of PDF peak reflectance in the visible light channel, and in the short-wave infrared channel, the sensitivity of DCC PDF peak reflectance is slightly lower than that of reflectance mean. In the visible-near-infrared band, the CERES ADM can better correct the effect of DCC reflectance anisotropy and is significantly better than the Hu model. However, neither of the two ADMs has obvious correction effect in the short-wave infrared band. Based on the above sensitivity studies, the threshold selection and ADM correction strategy in the DCC method are determined. The radiation response of FY-4A/AGRI reflected bands from March 2017 to April 2023 is tracked and evaluated. Results show that the radiation response of 0.47, 0.65, and 2.25 μm channels degrades significantly, with total attenuation rates of 45.55%, 26.22%, and 6.362%, respectively. This result provides a reference for updating the AGRI operation calibration coefficient.

A sensitivity analysis on the key factors in the radiometric calibration tracking method was conducted based on DCC for satellite optical sensors, enhancing calibration accuracy and stability through the establishment of an optimal solution. By utilizing optimization methods, the variations in the radiometric response performance in the reflectance band of the FY-4A/AGRI were quantitatively evaluated, providing valuable reference for updating the operational calibration coefficients of this instrument.

Key words: remote sensing and sensors, radiometric calibration, deep convective cloud, advanced geostationary radiation imager, angular distribution model, top of atmosphere reflectance, reflective solar bands

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3902901)