

基于稳定场地的太阳反射波段基准传递定标及其不确定性评估

胡奇¹, 何玉青¹, 徐娜^{2,3}, 何兴伟^{2,3}, 王玲^{2,3}, 王倩^{2,3}, 胡秀清^{2,3},
胡滨¹, 徐寒列^{2,3}

1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

3. 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

摘要: 空间辐射测量基准作为未来卫星定标的重要标准, 为卫星数据的量化应用提供了重要保障。通过传递定标方法实现辐射基准的传递可以提高卫星遥感器观测数据的整体精度。基于稳定场地的交叉定标作为太阳反射波段传递定标的一种主要方法, 因其选定了目标均匀且反射特性较稳定的场地作为辐射基准传递对象, 具有可靠性高、稳定性好、传递链条可追溯等优点。以利比亚场地为传递目标, 提出一套适合于太阳反射波段的传递定标方法及其不确定性分析方案, 系统分析传递定标方法的不确定性, 并通过不确定性的敏感性分析给出最优的场地交叉定标的匹配方案。以气象卫星中分辨率光谱成像仪为例, 以FY-3D MERSI-II和AQUA MODIS为代理数据, 针对引入不确定性的主要来源: 几何、时间、空间、光谱, 利用大气辐射传输模型与双向反射分布函数构建不确定性分析模型, 并通过蒙特卡罗方法多次模拟分析出各匹配条件对不确定性影响的敏感性, 以利比亚场地为例, 以各项不确定性小于1%作为约束, 确定场地交叉定标匹配阈值: 两遥感器观测天顶角之差应小于 $\pm 7^\circ$, 太阳天顶角之差小于 $\pm 6^\circ$, 相对方位角之差小于 $\pm 15^\circ$, 气溶胶厚度小于0.39, 观测场地均匀性小于0.02, 此条件下各通道总传递定标不确定性控制在1.5%, 定标频次平均一月一次。

关键词: 遥感, 不确定性, 场地交叉定标, 蒙特卡罗方法, 反射波段, 中分辨率光谱成像仪

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 胡奇, 何玉青, 徐娜, 何兴伟, 王玲, 王倩, 胡秀清, 胡滨, 徐寒列. 2024. 基于稳定场地的太阳反射波段基准传递定标及其不确定性评估. 遥感学报, 28(8): 2045-2061

Hu Q, He Y Q, Xu N, He X W, Wang L, Wang Q, Hu X Q, Hu B and Xu H L. 2024. Cross calibration over sites and uncertainty assessment for reflective solar bands. National Remote Sensing Bulletin, 28(8): 2045-2061 [DOI: 10.11834/jrs.20232095]

1 引言

卫星遥感技术发展十分迅速, 由最初的定性观察发展到如今的定量测量、溯源变化 (Ohning等, 2005), 逐渐成为气象观测活动的主要手段, 卫星遥感器所搭载的太阳反射波段通道因其直观、可视性好, 及其对粒子散射信号的敏感性等优点, 多用于大气、海洋、生态等领域, 成为最常用的工作波段。随着定量遥感能力的提升, 对卫星气候研究的需求越来越高, 而实际观测过程中气候

变化产生的信号非常微弱, 要求遥感器有较高的辐射定标精度与在轨稳定性, 目前大部分空间载荷并不具备这样的能力。为了解决这一问题, 国内外专家正在开展空间测量辐射基准研究 (Wielicki等, 2013; Fox等, 2017; Zhang等, 2020)。发射一颗具有溯源能力的超高精度辐射测量基准卫星, 通过传递定标技术将自身的精度传递给其他卫星, 提高载荷的整体精度 (卢乃锰等, 2020)。而传递定标过程中难免会存在精度的损失, 因此如何改进传递定标方法, 提升传递定标精度, 系统地评

收稿日期: 2022-04-06; 预印本: 2022-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504800, 2018YFB0504805)

第一作者简介: 胡奇, 研究方向为卫星定量遥感、卫星定标的理论和应用。E-mail: 3120200540@bit.edu.cn

通信作者简介: 徐娜, 研究方向为卫星定量遥感、卫星定标的理论和应用。E-mail: xuna@cma.gov.cn

估传递定标不确定性显得尤为重要。

传递定标是一种替代定标手段,最常用的方法分为同时过星下点观测(SNO)的传递定标和基于稳定目标的传递定标(Chander等, 2013b)。SNO是交叉传递定标最常用的方法之一,在全球范围内筛选两颗卫星的交汇情况,选择在几乎相同的时间、几何条件下观测的数据进行定标(Wu等, 2009; Hewison等, 2013)可以实现高频次以及相对高精度的定标。然而受卫星轨道限制,极轨卫星之间的SNO交叉点大多发生在高纬度地区,限制了其传递定标结果的适用性,并且由于SNO传递定标目标不固定,目标的均匀性和稳定性的筛选成为该方法的主要不确定性来源。场地交叉定标方法通过选取固定的稳定场实现定标系数的传递,使目标的均匀性与稳定性得到保障,是反射波段替代定标的常用方法。最初的场地定标方法中,需要卫星过境时,同步测量地表和大气参数,从而实现卫星遥感器的在轨定标(闵祥军等, 2002; Zhang等, 2004; 巩慧等, 2010; 黄红莲等, 2012)。这种定标方法精度较高,但是完成一次定标试验需要巨大成本,试验易受天气条件影响,定标频次低,无法为载荷的衰减追踪和订正提供足够的样本数据。因此为了提高定标频率,人们提出了准不变定标场PICS(Pseudo-Invariance Calibration Sites)定标方法,这种方法基于稳定目标和辐射传输模型,不需要同步的现场测量,通过已有的卫星数据产品得到地表反射率和大气参数,再通过辐射传输模型计算大气层顶部(TOA)反射率(孙凌等, 2013)。传统的PICS方法,使用辐射传输模型来解决由于时间、角度等差异引入的大气差异。为了降低气候态的背景大气参数引入带来的模拟误差,基于稳定目标场的卫星直接传递定标方法是反射波段传递定标的新趋势(Liu等, 2004; Lacherade等, 2013; Chen等, 2020)。通过合理的匹配约束,可以有效兼具SNO和PICS的优点,既避免了校正模型的引入误差,又能发挥场地目标自身稳定性,降低传递定标的不确定性。

随着定量应用对定标精度需求的不断提升,人们在探究传递定标方法的同时也在不断探索不确定性问题,定标的不确定性及其分析方法也成为了传递定标研究的重点方向(Wielicki等, 2013; Fox等, 2011)。Chander等(2013c)基于利比亚

场地对ETM+与MODIS场地交叉定标进行了不确定性分析,提出了“移窗法”被广泛用于空间不确定性分析。Gorroño等(2017)针对TRUTHS与CLARREO计划开展不确定性分析方法研究,将传递定标中的不确定性分为光谱、空间、时间3个方面,并分别提出了完整的分析方法。Mittaz等(2019)将计量学中的不确定性概念与分析方法在地球观测领域中进行系统的总结与分析,促进了定标中不确定性分析的规范化。由于场地交叉定标的理想条件即两卫星同时、同角度观测同一稳定场,但这种情况几乎不可能存在,因此需要放宽一定的约束条件来挑选合适的匹配样本,这就导致两卫星遥感器实际观测到样本存在角度、时间的差异,这些差异最终导致测得反射率的偏差,进而影响传递定标精度。

随着近年人们对稳定场研究的重视,基于PICS传递定标的频次越来越高,有必要建立一种通用的基于场地交叉定标以及不确定分析方法,针对不同场地给出不同的传递定标不确定性。本文以利比亚稳定沙漠场(Libya4)为例,以FY-3D上搭载的中分辨率光谱成像仪II(MERSI-II)为目标遥感器,AQUA搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)为基准遥感器,系统地开展场地交叉定标方法与不确定性分析研究。分析利比亚场地地表和大气的变化特性,基于场地交叉定标方法及其链路的不确定性分析方法,针对MERSI-II与MODIS传递定标具体过程分析各因子的不确定性,并通过敏感性试验综合确定场地交叉定标方法的匹配约束条件。

2 传递定标场地与数据介绍

2.1 场地选择

辐射定标场的选择是场地交叉定标方法中的关键环节,它直接影响遥感器的辐射定标精度。为减小在轨传递定标过程中各个环节的不确定度,定标场的选取需从地表特征和大气特征等多方面考虑。地球观测卫星委员会(CEOS)校正及验证工作小组(WGCV)确定的PICS是国际公认的适合气象海洋卫星传递定标的场地。利比亚沙漠是其中公认的稳定度最高的场地之一,适合气象、海洋中低分辨率卫星进行传递定标,因此本文主要以利比亚场地为例开展研究。

利比亚场地中心位于28.55°N, 23.39°E, 选取了利比亚场地为中心的250 km×250 km足够大的区域(图1)作为研究对象, 这片沙漠地区相对平坦, 主要由沙丘组成, 植被稀少, 平均海拔118 m。利比亚的大气条件非常稳定, 同时又存在一定的季节性规律。利用2015年—2020年间MODIS气象数据集产品MYD08D3资料分析了利比亚的大气变化特性(图2), 气溶胶光学厚度(AOD)总体稳定在0.25—0.45, 夏季幅值偏高, 呈现较为明显的季节性分布; 水汽含量主要分布在1—3 g/cm², 在6—8月间水汽含量较高, 7月份达到峰值, 10月到次年2月间水汽含量较低, 且比较稳定; 臭氧含

量非常稳定, 全年保持在0.24—0.3 cm·atm范围内, 变化极小。

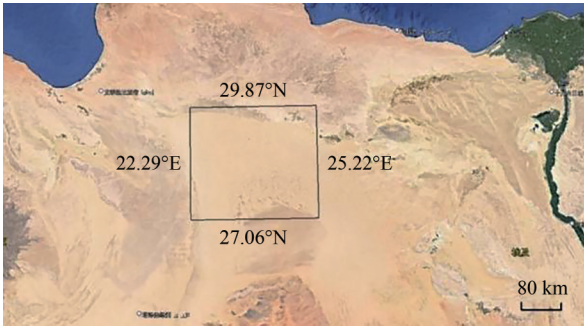


图1 利比亚场地研究区域(框选区域)
Fig. 1 Libya desert site (Boxed area)

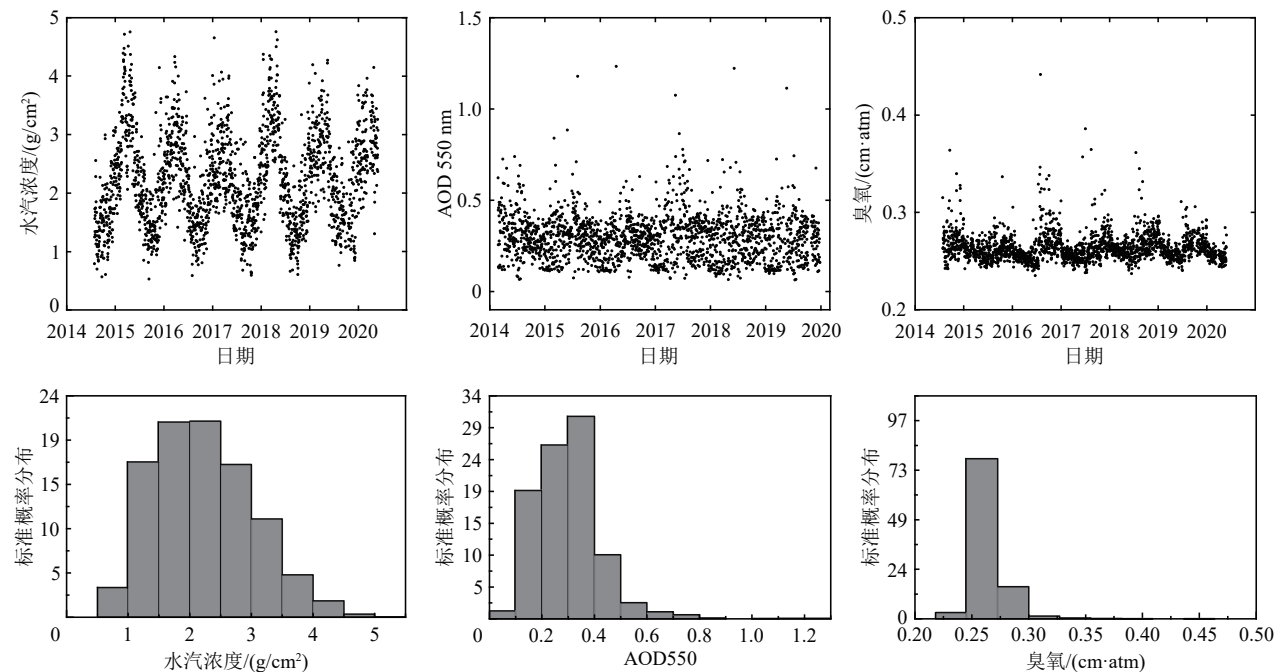


图2 利比亚场地大气变化规律
Fig. 2 Atmospheric variation of Libya

利比亚的地表稳定性与均匀性同样非常优异, Bhatt等(2014)利用2002年—2013年间MODIS过利比亚场观测资料, 分析了年反射率均值变化情况, 在近11年间场地非稳定性 $I(\lambda)$ 在2%以内。

$$I(\lambda) = \frac{\sigma(\lambda)}{\text{Mean}(\lambda)} \quad (1)$$

式中, λ 为波长, $\text{Mean}(\lambda)$ 为年反射率均值, $\sigma(\lambda)$ 为11年间反射率年均值的标准差。

利用MODIS当地正午时刻过利比亚的长时间序列垂直地表反射率资料, 以2020年7月1日(太阳天顶角接近0°)观测值为参考, 分析利比亚场地一年内地表反射率随太阳天顶角和时间的变化

关系, 如图3所示。可见, 利比亚场地反射率的年内不确定性(相对标准差)变化在2%以内, 图中 $\text{STD.DEV}/\text{Mean}$ 代表相对标准差, Correl 为变量间的相关系数, 可见550 nm波段地表变化与太阳角度高度相关, 季节性较明显, 470 nm呈中度相关, 而650 nm与865 nm波段则相关性较低, 未表现出季节相关性。

2.2 卫星遥感器与卫星数据

研究使用2020年Aqua卫星过境利比亚目标场地的Collection 6.0版本MYD021KM辐射定标产品、MYD03地理定位产品, 以及2020年FY-3D过境

利比亚目标场地的中分辨率光谱成像仪 L1 数据 (1 km)，同时还通过 Landsat 8 对应的 LC08L1TP 数据构建高空间分辨率的模拟数据。其中 MERSI-II 与 MODIS 分别作为本次研究中的目标传感器与基准传感器，Landsat 8 OLI 数据则在空间不确定性分析中用于场地均匀性的敏感性分析。

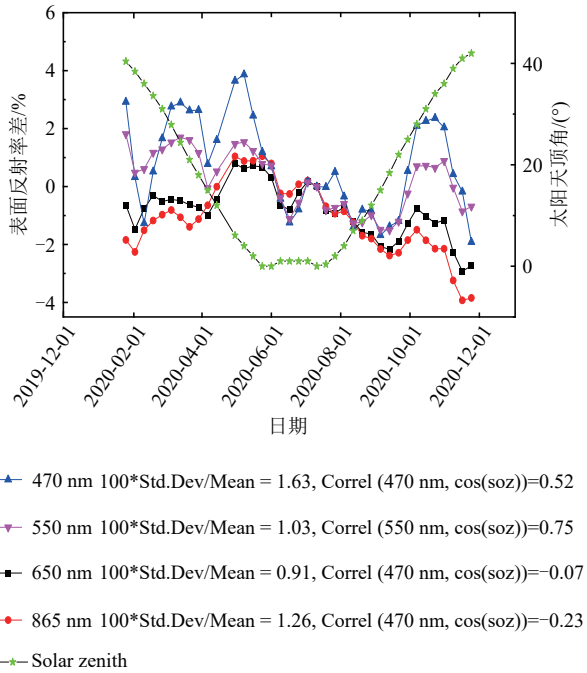


图3 利比亚场地地表反射率与太阳天顶角年变化图
Fig. 3 Annual variation of surface reflectance and solar zenith angle for Libya site

MODIS 和 MERSI-II 均为中分辨率光谱成像传感器，可以实现对大气、陆地、海洋的多光谱连续综合观测。MODIS 具有 36 个光谱通道，其中 20 个通道为太阳反射波段，波长范围 0.41—2.2 μm ，空间分辨率最高可达 250 m。MODIS 作为目前公认定标最可靠的传感器之一，其定标精度达 1%—3% (Xiong 等, 2010; Wu 等, 2013)。MERSI-II 具有 25 个光谱通道，其中 19 个为太阳反射波段，光谱覆盖范围和空间分辨率与 MODIS 相似 (表 1)。

Landsat 8 卫星搭载的 OLI 在太阳反射波段空间分辨率均为 30 m，同时也具有与前两者相似的光谱通道，利用其模拟 MERSI-II 与 MODIS 对利比亚场地的观测，可以更好地分析定位误差以及分辨率所引入的不确定性。本文以应用最多的蓝、绿、红以及可见近红外 4 个通道为例开展方法研究，表 1 显示了 OLI、MERSI-II 与 MODIS 对应通道归一化的光谱响应分布。

表 1 OLI、MERSI-II 与 MODIS 光谱波段指标
Table 1 Spectral band specifications for OLI, MERSI-II and MODIS

传感器	通道	中心波长/ μm	通道带宽/ μm	空间分辨率/m
OLI	CH2	0.481	0.450—0.515	30
	CH3	0.560	0.525—0.600	30
	CH4	0.654	0.630—0.680	30
	CH5	0.864	0.845—0.885	30
MERSI-II	CH1	0.470	0.430—0.512	250
	CH2	0.550	0.512—0.597	250
	CH3	0.650	0.613—0.697	250
	CH4	0.865	0.827—0.922	250
MODIS	CH3	0.469	0.459—0.479	500
	CH4	0.555	0.545—0.565	500
	CH1	0.645	0.620—0.670	250
	CH2	0.858	0.841—0.876	250

3 传递定标及不确定性分析方法

传递定标方法通过两传感器对相同场地观测，将基准传感器的辐射观测结果传递到目标传感器并与目标传感器的响应计数值建立关系，实现辐射基准的传递。理想条件下两仪器要在相同条件下观测相同目标，并且要求两仪器具有相同的空间与光谱响应特性。由于绝对理想化条件在实际应用过程中难以实现，因此需要放宽约束条件来实现传感器之间的观测信息传递。图 4 给出传递定标以及不确定性分析的基本流程。传递定标分为匹配约束和样本过滤两个环节，通过匹配约束实现时间、空间、几何以及光谱方面的数据匹配，样本过滤在匹配约束的基础上限制引入不确定性的环境因素，进一步降低传递定标的不确定性，如何降低匹配约束引入的不确定性成为传递定标的关键。时间、几何、空间等方面的约束匹配也是传递定标方法中的主要不确定性来源。时间匹配的差异会引入由于大气组分改变导致大气辐射传输的不确定性；观测几何匹配的差异会引入由于地表双向反射效应以及大气辐射传输路径改变导致的不确定性；如何选择最佳的匹配约束条件是降低时间、空间、几何等差异引入的不确定性的关键。考虑到定标过程中各项不确定性因素间复杂的耦合性难以评估，为了简化问题的复杂性，本文采用了一种在实际遥感研究中广泛应用的方法，即假设不确定性间为独立关系，并分别建立

模型评估。通过对各影响因素进行不确定性分析可以确定传递定标过程中的精度损失, 并通过敏感性分析确定满足测量不确定性小于1% (Zhang等, 2020) 的匹配约束条件。模型采用了蒙特卡罗方法 (MCM) 进行不确定性分析, 即: 先统计引入不确定性因素自身的概率分布情况, 在此分布内多次随机采样 (本研究为10000次), 作为模型输入得出TOA反射率的分布情况, 通过统计TOA反射率相对偏差得到不确定性。不确定性为最佳估计值附近的区间, 接近68.27%的包含率 (表示为 $k=1$)。其中 k 为覆盖因子, 用以表示不确定度所代表的置信区间范围。

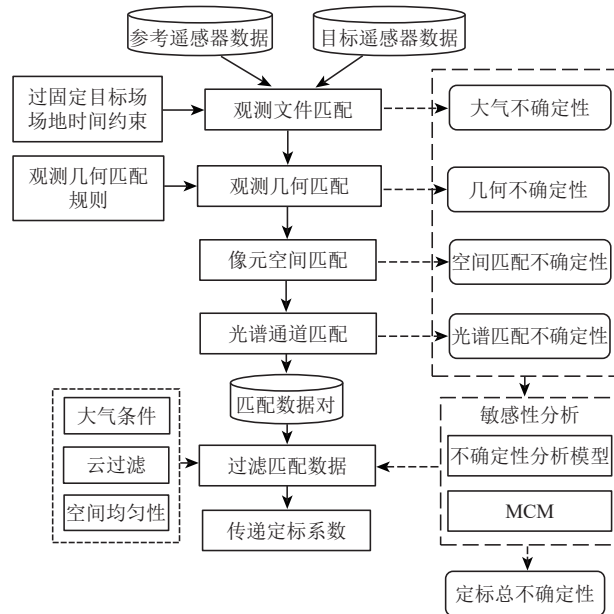


图4 场地交叉定标与不确定性分析方法流程

Fig. 4 Flow of cross calibration and uncertainty analysis

3.1 观测几何匹配及其不确定性分析

为了能够获得足够的匹配样本, 并且尽可能避免由几何差异引起的场地双向反射影响以及大气路径变化, 以目标遥感器的观测角度为中心, 定义一个几何窗口 (Lacherade等, 2013), 实现几何条件约束,

$$|\theta_v^{\text{TAR}} - \theta_v^{\text{REF}}| < \Delta\theta_v \quad (2)$$

$$|\theta_s^{\text{TAR}} - \theta_s^{\text{REF}}| < \Delta\theta_s \quad (3)$$

$$\| \varphi_s^{\text{TAR}} - \varphi_v^{\text{TAR}} - [\varphi_s^{\text{REF}} - \varphi_v^{\text{REF}}] \| < \Delta\varphi_{\text{phi}} \quad (4)$$

式中, TAR为目标遥感器, REF为参考遥感器, θ_s 与 θ_v 分别表示太阳天顶角与观测天顶角, φ_s 与 φ_v 分别表示太阳方位角与观测方位角, φ_{phi} 为相对方位角。

值得注意的是在不同中心角度下, 相同大小

的几何窗口引入的不确定性也并不相同, 因此还需对几何窗口的中心角度进行约束, 如下式:

$$\theta_s^{\text{TAR}} < \alpha \quad (5)$$

$$\theta_v^{\text{TAR}} < \beta \quad (6)$$

$$\varphi_{\text{phi}}^{\text{TAR}} > \gamma \quad (7)$$

式中, α , β , γ 均通过后续不确定性分析确定。

几何不确定性主要来自不同太阳与观测角度下, 定标场地的双向反射效应以及大气路径不同导致的大气层顶反射辐射的差异。因此需要基于目标场地的双向反射分布函数 (BRDF) 利用辐射传输对不同几何条件下的TOA反射率进行模拟分析。本文采用Ross-Li半经验核驱动模型 (Li等, 1999) 计算地表反射率分析太阳几何角度变化对地表反射率的影响, 再利用辐射传输模型综合分析几何条件改变导致太阳能量和大气路径变化带来的影响。给定不确定性的目标要求指标, 通过上述模型采用MCM多次模拟可以确定几何约束阈值与其造成的几何不确定性间的敏感性关系, 从而最终确定几何窗口约束范围。

$$P_{\text{TOA}}^{\text{ang}} = \text{Model}_{\text{ang}}(P_{\text{ang}}) \quad (8)$$

$$U_{\text{ang}} = \text{Mean}(P_{\text{TOA}}^{\text{ang}}) + k \times \text{Std.Dev}(P_{\text{TOA}}^{\text{ang}}) \quad (9)$$

式中, $\text{Model}_{\text{ang}}$ 为几何不确定性分析模型, P_{ang} 与 $P_{\text{TOA}}^{\text{ang}}$ 分别为定标过程中几何角度概率密度函数 (PDF) 以及经模型传播后的TOA反射率相对偏差分布情况, Mean为均值, Std.Dev为标准差, U_{ang} 为最终几何不确定性。

3.2 时间匹配及其不确定性分析

考虑到与时间差异相关性最高的太阳角度的影响在观测几何匹配中进行了约束, 因此这里没有对观测时间差异再进行约束, 认为匹配数据过场地时间在同一天内是可以接受的。由于短时间内大气环境的变化往往难以评估, 因此为了减小大气变化所引入的定标不确定性, 进一步对大气条件进行限制, 尽可能保证晴朗稳定的大气条件,

$$\text{AOD}_{550} < \chi \quad (10)$$

式中, AOD550为场地550 nm处AOD。

在不考虑太阳角度变化的前提下, 时间配准过程中主要的不确定性来源是大气条件变化导致的辐射影响。因此时间不确定性分析主要通过辐射传输模型模拟大气条件变化对TOA反射率的影响, 采用MCM多次模拟确定大气约束阈值与其造成的时间不确定性间的敏感性关系。

$$P_{\text{TOA}}^{\text{temp}} = \text{Model}_{\text{temp}}(P_{\text{temp}}) \quad (11)$$

$$U_{\text{temp}} = \text{Mean}(P_{\text{TOA}}^{\text{temp}}) + k \times \text{Std.Dev}(P_{\text{TOA}}^{\text{temp}}) \quad (12)$$

式中, $\text{Model}_{\text{temp}}$ 为时间不确定性分析模型, P_{temp} 与 $P_{\text{TOA}}^{\text{temp}}$ 分别为定标过程时间差内大气 PDF 以及经模型传播后的 TOA 反射率相对均值的偏差分布情况, Mean 为均值, U_{temp} 为最终时间不确定性。

3.3 空间匹配及其不确定性分析

像元空间匹配和均匀目标筛选问题在场地交叉定标结果准确性上起着非常重要的作用, 由于两传感器观测像元地面分辨率的差异以及定位误差等因素的影响, 匹配过程中我们对于感兴趣区域 (ROI) 的选取往往会成为空间匹配问题的关键所在。空间匹配除了完成观测像元空间位置的配准, 还需要进行云剔除和目标均匀性过滤。根据经验, 利用近红外波段 (865 nm) 和热红外窗区通道 (10.8 μm) 联合进行云剔除, 该方法可以剔除较为明显的云区, 残余卷云则可通过均匀性筛选进一步剔除。通过空间变异系数 σ 对 $n \times n$ 像素的 ROI 区域进行均匀性约束,

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}}{\bar{\rho}} < \sigma_0 \quad (13)$$

式中, $\bar{\rho}$ 为 ROI 内 TOA 反射率均值, ρ_i 为 ROI 内第 i 个像素的 TOA 反射率, 本研究 $n=5$ 。

像元空间匹配误差所引入的不确定性可以通过移动窗口法 (Chander 等, 2013c) 模拟分析。考虑到匹配误差在不同空间均匀性下的差异, 在不同空间均匀性下, 将选择的 ROI 区域在各个方向上进行像素的移动, 并对比移动前后 ROI 区域反射率均值, 从而确定其引入的不确定性, 根据均匀性约束阈值与空间不确定性间的敏感性规律确定空间均匀性约束阈值。

$$pb_{\sigma} = \frac{|\overline{\rho_{\text{after}(\sigma)}} - \overline{\rho_{\text{before}(\sigma)}}|}{\overline{\rho_{\text{before}(\sigma)}}} \times 100\% \quad (14)$$

$$U_{\text{spa}} = pb_{\sigma_0} \quad (15)$$

式中, pb_{σ} 为对应空间均匀性为 σ 的 ROI 区域因定位误差导致的 TOA 反射率相对偏差, $\overline{\rho_{\text{before}(\sigma)}}$ 与 $\overline{\rho_{\text{after}(\sigma)}}$ 分别为空间均匀性 σ 下的 ROI 移动 1 km 前后的 TOA 反射率均值, U_{spa} 为最终空间不确定性。

3.4 光谱匹配及其不确定性分析

传递定标过程中由于参考传感器与目标遥感

器光谱响应函数 (SRF) 差异, 在观察同一目标时可能会产生不同的结果。因此, 可以通过光谱匹配因子 (SBAF) 来补偿两传感器间的固有差异 (Chander 等, 2013a), SBAF 指在相同条件下观测同一目标, 两传感器相似通道的天顶反射率之比。

$$\bar{\rho}_{\lambda} = \frac{\int \rho_{\lambda} \text{SRF}_{\lambda} d\lambda}{\int \text{SRF}_{\lambda} d\lambda} \quad (16)$$

$$\text{SBAF} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}}}{\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{TAR}}} \right)_i}{n} \quad (17)$$

$$\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}*} = \frac{\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}}}{\text{SBAF}} \quad (18)$$

式中, SRF_{λ} 为探测器的光谱响应函数, ρ_{λ} 为高光谱 TOA 反射率, $\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{TAR}}$ 为目标传感器的模拟 TOA 反射率, $\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}}$ 为基准传感器的模拟 TOA 反射率, $\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}*}$ 为通过 SBAF 对基准传感器的 TOA 反射率进行补偿, 以匹配目标传感器的 TOA 反射率。

通过对长时间序列下匹配数据拟合得到 SBAF, 可以有效降低由于光谱不匹配而引入的不确定性, 然而其准确性往往受限于 ρ_{λ} 对目标光谱特征的包含情况, 并且受传感器自身 SRF 准确性影响, 订正后的模拟 TOA 反射率与真值前往往仍存在无法忽略的误差, 因此由光谱差异引入的不确定性可以表示为

$$\text{bias}_{\text{spec}} = \frac{\rho_{\lambda}^{\text{TAR}} - \bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}*}}{\bar{\rho}_{\lambda}^{\text{REF}*}} \times 100\% \quad (19)$$

$$U_{\text{spec}} = |\text{Mean}(P_{\text{TOA}}^{\text{spec}})| + k \times \text{Std.Dev}(P_{\text{TOA}}^{\text{spec}}) \quad (20)$$

式中, $\rho_{\lambda(\text{TAR})}$ 为目标探测器测得 TOA 反射率真值, $\text{bias}_{\text{spec}}$ 为订正后模拟 TOA 反射率与测量真值的相对偏差, $P_{\text{TOA}}^{\text{spec}}$ 为长时间序列匹配数据的 $\text{bias}_{\text{spec}}$ 概率密度函数, U_{spec} 为最终光谱不确定性。

4 结果与分析

4.1 观测几何不确定性与约束

为了分析观测几何变化带来的不确定性, 首先对 2020 年两传感器过利比亚场地地理定位数据中观测几何匹配情况统计分析。如图 5 所示, MODIS 对利比亚场地观测角度呈现明显的阶跃分布, 轨道周期稳定, 而 MERSI-II 观测角度则未呈现明显的分布规律, 两载荷观测场地的角度差异总体服从正态分布, 平均差异 -3.3° , 标准差 21.3° 。如图 6 所示, 传感器过场地时太阳天顶角分布情况

受季节变化影响明显, 冬季较高夏季较低, 且夏季受太阳轨道影响, 分布明显更分散。匹配数据的太阳天顶角差值同样服从正态分布, 差异均值 -0.76° , 标准差 4° 。如图7所示, 遥感器过场地相对方位角近似二项分布, 且受到季节波动影响, 存在类似

三角函数形式的变化, 相对方位角差值则近似服从 0° 与 180° 的二项分布。且在2020年8月份明显存在匹配数据的缺失, 证明两卫星在8月份存在轨道重合的空窗期。

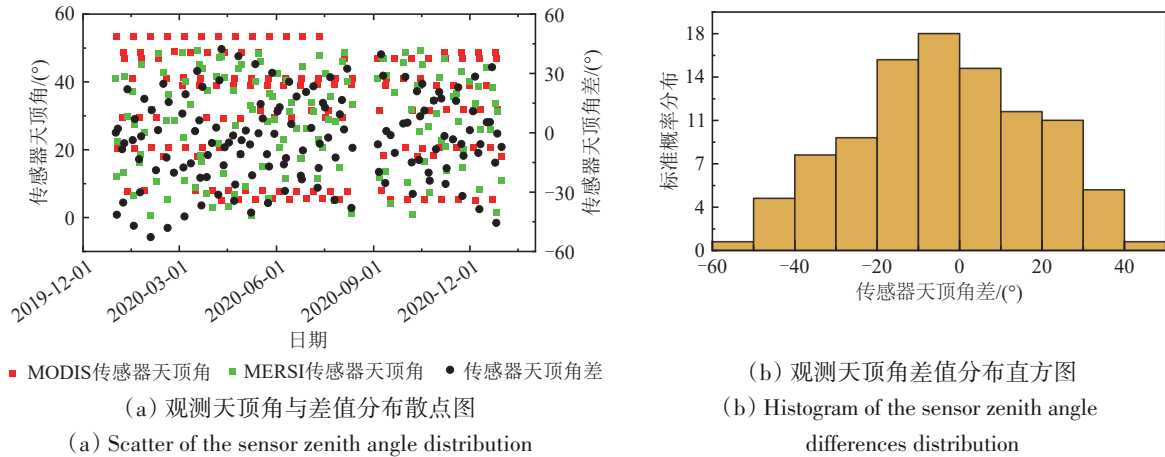


图5 2020年MERSI-II与MODIS过利比亚观测天顶角统计情况

Fig. 5 Statistics of sensor zenith angle between MERSI-II and MODIS over Libya observations in 2020

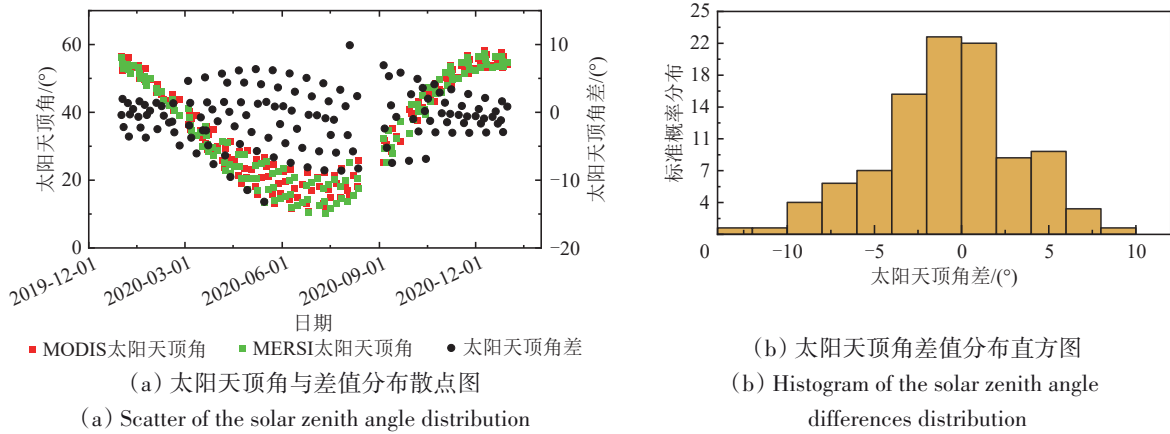


图6 2020年MERSI-II与MODIS过利比亚太阳天顶角统计情况

Fig. 6 Statistics of solar zenith angle between MERSI-II and MODIS over Libya observations in 2020

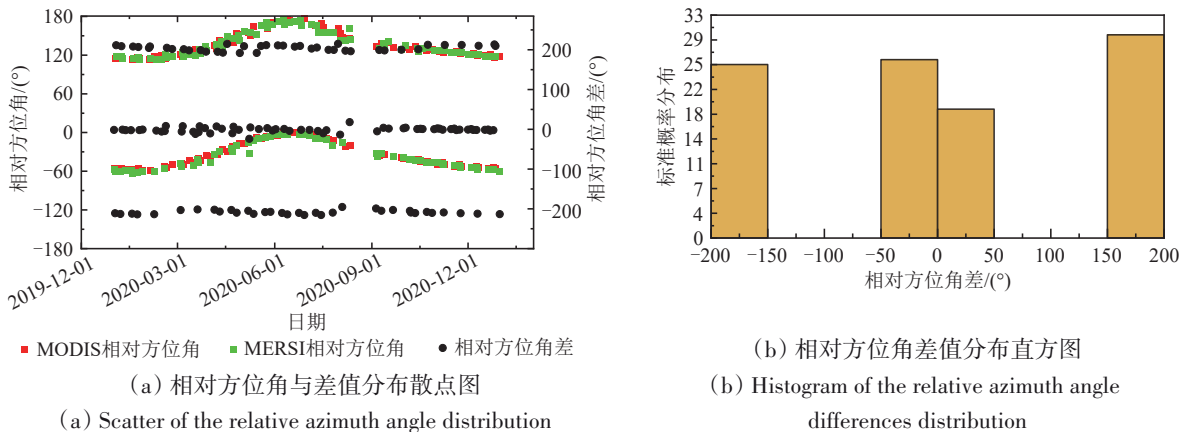


图7 2020年MERSI-II与MODIS过利比亚相对方位角统计情况

Fig. 7 Statistics of relative azimuth angle between MERSI-II and MODIS over Libya observations in 2020

研究采用典型大气条件, 水汽含量 2.23 g/cm^2 、AOD (550 nm) 0.3、臭氧含量 $0.26 \text{ cm} \cdot \text{atm}$, 通过 MODIS 的 BRDF 反射率模型产品 MCD43C1, 构建利比亚场地 BRDF 模型, 评估地表双向反射效应。采用 6SV 矢量模型 (Wilson, 2013), 在角度限制范围内假设角度变化呈正态分布, 综合模拟角度变化引起的大气路径以及地表反射率变化对 TOA 反射率的影响。

以蓝色波段 470 nm 为例, 图 8 模拟了典型大气条件下不同观测几何情况下太阳天顶角差异对 TOA 反射率的影响。选择典型相对方位角 120° , 观测天顶角 20° 、 35° 、 50° 进行多角度模拟。图 8

中不确定性曲线呈现出“山峰”形状的分布, 越靠近峰值角度下对于太阳天顶角变化所引起的不确定性容忍度越高, 且随着观测天顶角增大, 峰值对应太阳天顶角位置逐渐变小。图 9 展示了观测天顶角对蓝色波段 TOA 反射率的影响, 可以看到其不确定性曲线与太阳天顶角变化展现出相似的变化规律, 且当太阳天顶角与观测天顶角均处于 30° — 35° 间出现两者峰值重合的情况, 此角度范围展现出对角度差的最优容忍度。综合分析当 $\theta_s^{\text{TAR}} < 40^\circ$ 且 $\theta_v^{\text{TAR}} < 40^\circ$ 时, $\Delta\theta_v = 7^\circ$, $\Delta\theta_s = 6^\circ$ 角度限制下可以满足不确定性优于 1% 的要求。

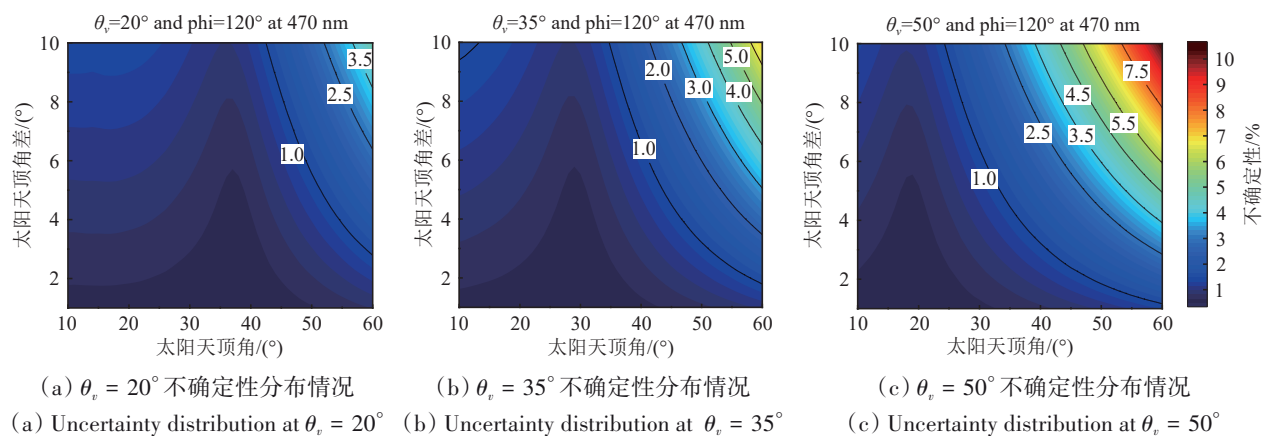


图 8 太阳天顶角限制对 TOA 反射率不确定性的影响

Fig. 8 Uncertainty sensitivity of the Solar zenith angle limitation to TOA reflectance

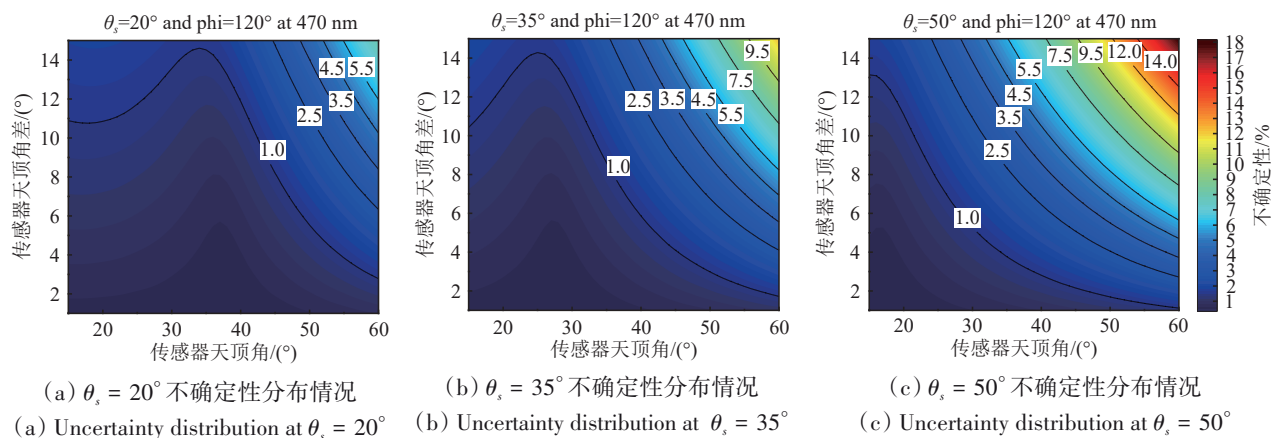


图 9 观测天顶角限制对 TOA 反射率不确定性的影响

Fig. 9 Uncertainty sensitivity of the Sensor zenith angle limitation to TOA reflectance

当 θ_s^{TAR} 与 θ_v^{TAR} 角度接近 0° 时, 方位角对 TOA 反射率的影响极小, 但随着 θ_s^{TAR} 与 θ_v^{TAR} 增大, 相对方位角对 TOA 反射率的影响变得显著。图 10 模拟在各天顶角条件下由于相对方位角变化对 TOA 反射

率影响, 呈现出“倒山峰”的分布形状, 在 $|\varphi_{\text{phi}}^{\text{TAR}}| > 120^\circ$ 条件下 $\Delta\varphi_{\text{phi}} = 15^\circ$ 即可满足 1% 不确定性要求。

观测几何匹配阈值设置在 $\theta_s^{\text{TAR}} < 40^\circ$, $\theta_v^{\text{TAR}} < 40^\circ$, $|\varphi_{\text{phi}}^{\text{TAR}}| > 120^\circ$, $\Delta\theta_s = 6^\circ$, $\Delta\theta_v = 7^\circ$, $\Delta\varphi_{\text{phi}} = 15^\circ$

条件下在阈值内取几何角度正态分布, 计算得各波段TOA反射率误差分布如图11所示, 图11中阴影部分表示 $k=1$ 条件下不确定性区间。其中470 nm

波段受阈值影响最为严重, 不确定性可达0.85%, 其余波段不确定性均在0.5%以内。

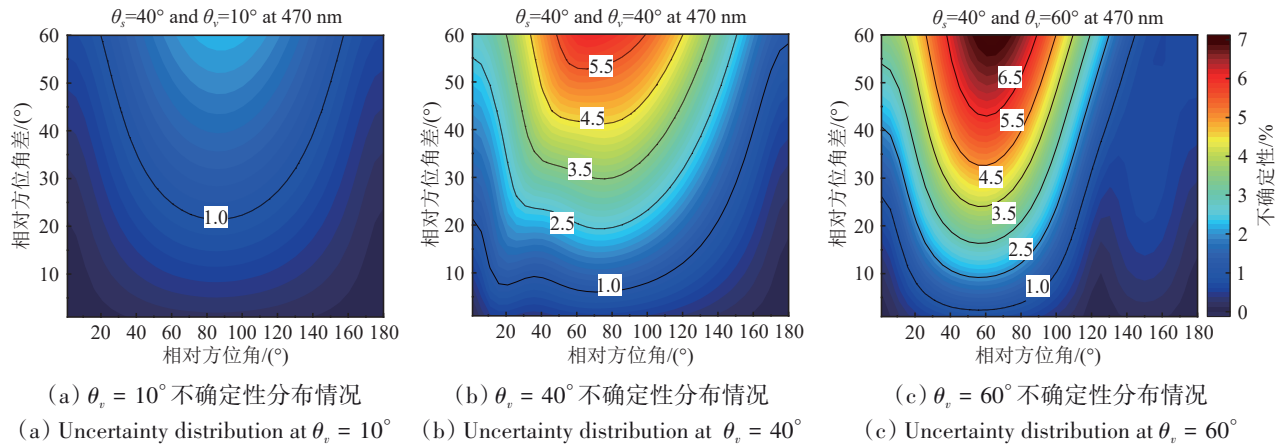


图10 相对方位角限制对TOA反射率不确定性的影响

Fig. 10 Uncertainty sensitivity of the Relative azimuth angle limitation to TOA reflectance

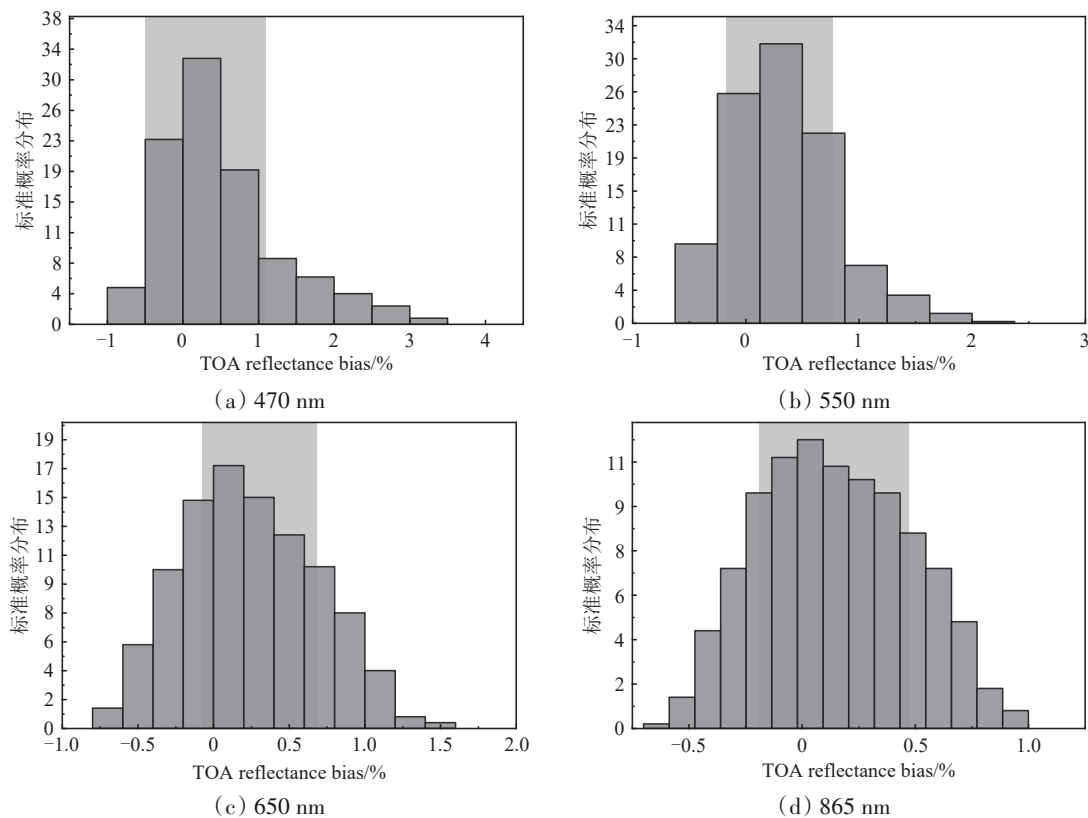


图11 观测几何限制条件下各波段TOA反射率相对偏差分布

Fig. 11 TOA reflectance factor relative bias distribution for each waveband under geometric restrictions of observation

4.2 时间匹配不确定性与大气约束

图13展示了匹配数据的时间分布特征, 可看出MODIS与MERSI-II观测利比亚场地时间存在明显周期性规律, 与自身卫星轨道相关, 在 $\Delta\theta_s = 6^\circ$

的约束条件下, 对应时间差异存在明显的季节相关性, 夏季时间约束较强, 可达35 min左右, 而冬季约束较弱, 约为50 min。在如此短的时间间隔内大气变化主要来自于气溶胶。通过统计分析

2018年最临近利比亚场地的 AERONET 地基站点气溶胶数据, 如图 14 所示, 气溶胶谱形在年内分布较为一致, 均满足 Angstrom 指数分布, 因此研究采用气溶胶数据典型波段 550 nm 作为代表波段, 进行分析。图 12 中, 分别挑选 AOD 月均值小于 0.1, 0.4, 0.7 等 3 个月短时间采样间隔数据, 统计分析发现, 采样间隔 15 min 内 AOD 变化相对采样时间间隔呈现正相关趋势, 而 15—60 min 内 AOD 变化与时间相关性不明显。因此定标时间约束设置为一小时可以最大限度保留匹配数据量且有效限制定标不确定性。而短时间内 AOD 变化最大范围与当前状态下 AOD 自身大小呈较明显的正相关

趋势, 因此需要对定标时 AOD 进行约束。通过统计分析 2015 年—2020 年利比亚场地气溶胶含量 (图 2), 分布的随机性较强, 但总体服从均值 0.307, 标准差 0.136 的正态分布。在此分布下改变 AOD 上限阈值进行随机采样分析, 输入 6SV 矢量模型。图 15 显示了改变 AOD 约束条件对研究波段 TOA 反射率的测量不确定性影响, 由图可见各波段测量不确定性与气溶胶厚度约束呈线性关系, 考虑到 470 nm 对气溶胶变化最敏感, 所以以该波段为基准进行约束。当 $AOD_{550} < 0.39$ 时可以满足 1% 不确定性要求。本方法考虑了 AOD 变化较大的最差情况, 实际定标绝大多数情况下不确定性会更低。

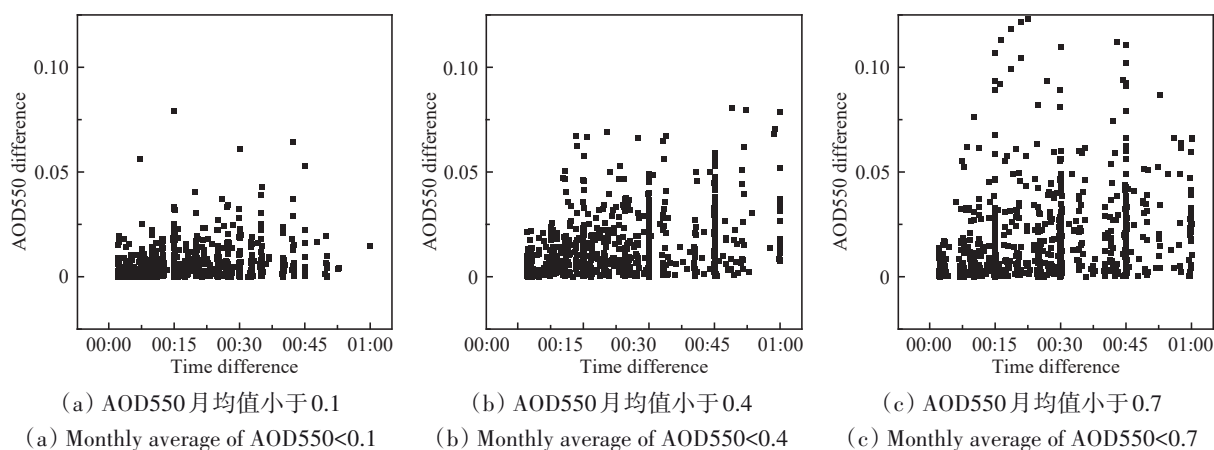


图 12 不同 AOD 水平下短时间内 AOD 变化情况

Fig. 12 AOD difference between a short period of time at different average of AOD

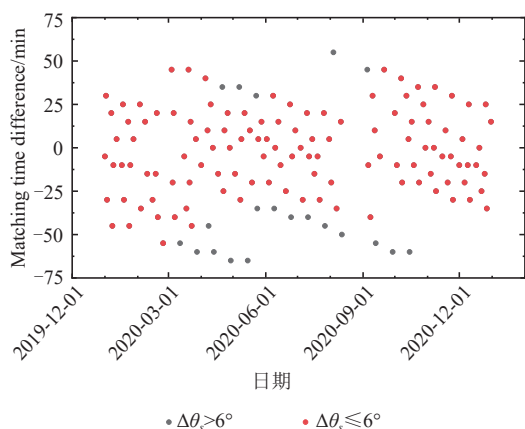


图 13 2020 年 MERSI-II 与 MODIS 过利比亚时间差
Fig. 13 Time difference between MERSI-II and MODIS over Libya observations in 2020

水汽为稳定大气参量, 短时间内变化较小, 定标时不考虑其变化的影响。图 16 采用 2020 年数值天气预报 (NWP) 数据对利比亚场水汽含量变

化进行分析, 结果可见水汽变化呈现夏季弱, 冬季强的变化规律, 可能与利比亚北部靠近地中海的气候状况相关, 最坏情况下每小时水汽变化达 0.049 g/cm^2 其导致的测量不确定性低于 0.1%, 因此不考虑水汽变化引入的不确定性。

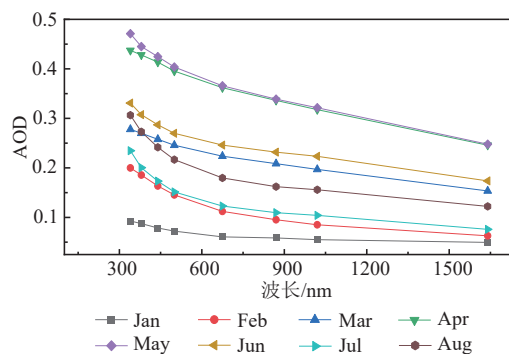


图 14 2018 年 AOD 谱形月平均情况

Fig. 14 Monthly average of AOD spectral shapes in 2018

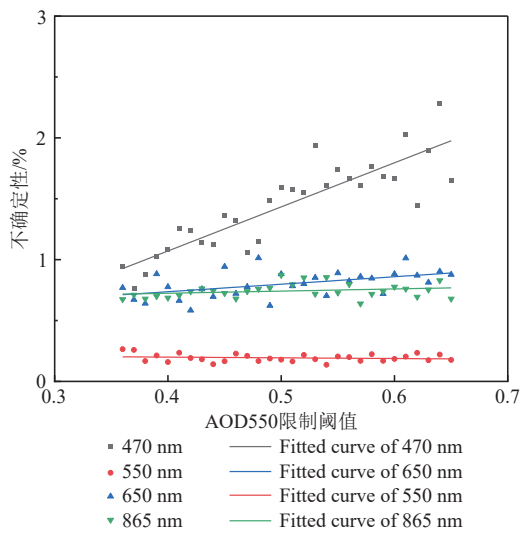


图 15 气溶胶厚度限制阈值对 TOA 反射率不确定性的影响
Fig. 15 Uncertainty sensitivity of AOD550 threshold to TOA reflectance

最终对 $AOD550 < 0.39$ 大气约束条件下各波段不确定性分析, 大气条件在约束范围内以正态分

布作为输入, 通过模型传播得 TOA 反射率误差分布如图 17 所示, 阴影部分表示 $k=1$ 条件下不确定性区间, 包括目标波段 (470 nm) 在内的各波段不确定性均在 1% 以内。

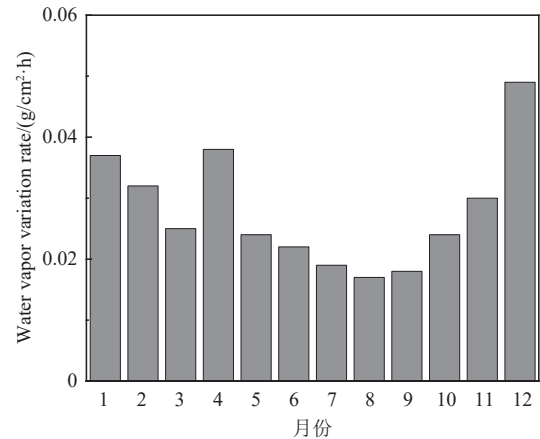
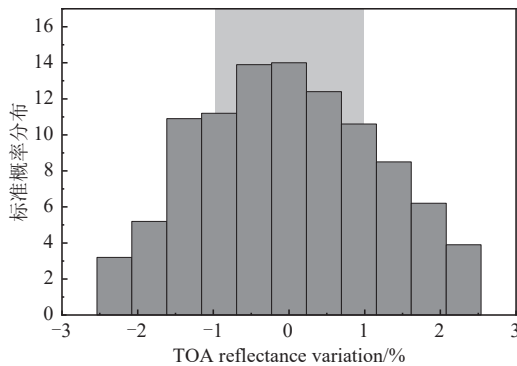
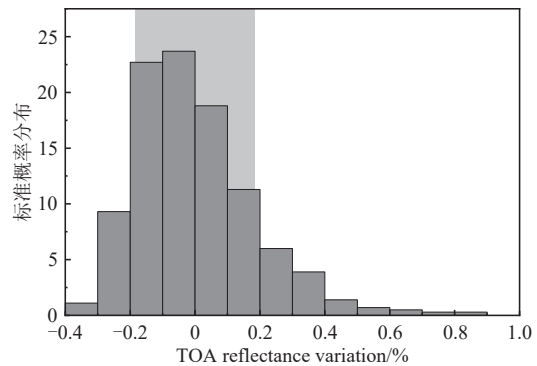


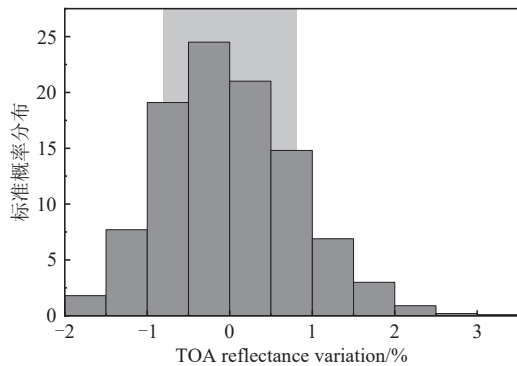
图 16 利比亚场地水汽变化(每小时)月分布情况
Fig. 16 Monthly distribution of water vapor variation (Hourly) of Libya



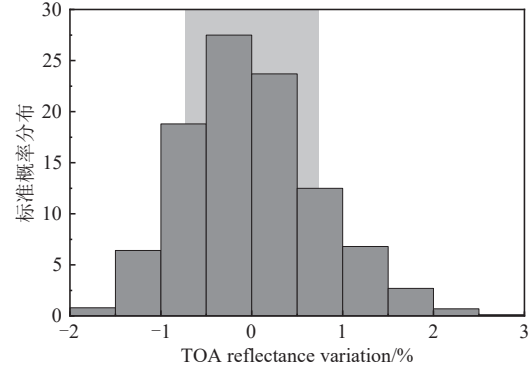
(a) 470 nm



(b) 550 nm



(c) 650 nm



(d) 865 nm

图 17 大气条件限制下各波段 TOA 反射率相对偏差分布

Fig. 17 TOA reflectance factor relative bias distribution for each waveband under atmospheric restrictions

4.3 空间匹配不确定性与均匀性约束

研究采用 OLI 采集的利比亚场地影像, 根据经验利用波段 865 nm 反射率大于 0.65, 且波段 $10.8 \mu\text{m}$ 亮温小于 260 K 的阈值进行云剔除。对云

剔除后的影像采用移窗法分析, 选择 $5 \times 5 \text{ km}$ 的 ROI, 对 ROI 按照式 (10) 计算均匀性后, 将不同均匀性下的 ROI 分别通过移窗法分析。图 18 表明场地 σ 与定位误差所导致的空间不确定性存在着

较明显的正相关性，选取典型波段 470 nm 进行拟合发现，地表均匀性限制 σ_0 从 0.025 降至 0.020 时不确定性降低显著，而继续减小 σ_0 后对不确定性影响很小。因此认为 σ_0 设在 0.020 时可以控制空间匹配不确定性。

如图 19 为场地均匀性 $\sigma=0.020$ 情况下，采用移动窗口法对各通道进行了 TOA 反射率变化相对于定位误差的敏感性分析，横纵坐标代表了定位误差偏移的距离。各通道均呈现出相似的趋势，随偏移距离增大，不确定性也随之增长。而在东西方向偏移 350 m 处出现明显的不确定性波动，是对地表真实场景变化的典型表现，在整个分析的过程中，对于两卫星传感器之间匹配误差达 1 个像素（1 km）的情况下，各通道所导致的不确定性也在 0.15% 内。

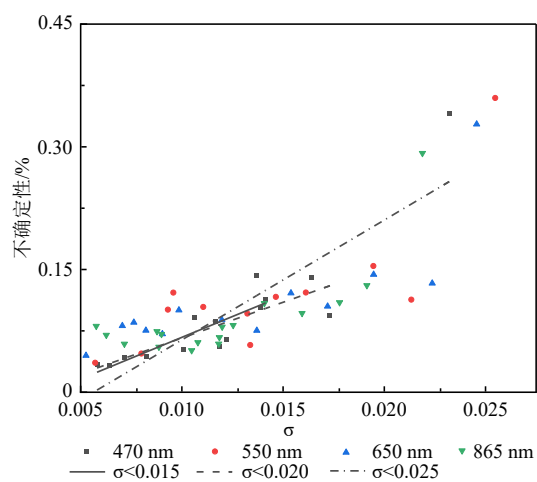


图 18 空间变异性对 TOA 反射率不确定性的影响
Fig. 18 Uncertainty sensitivity of spatial variability to TOA reflectance

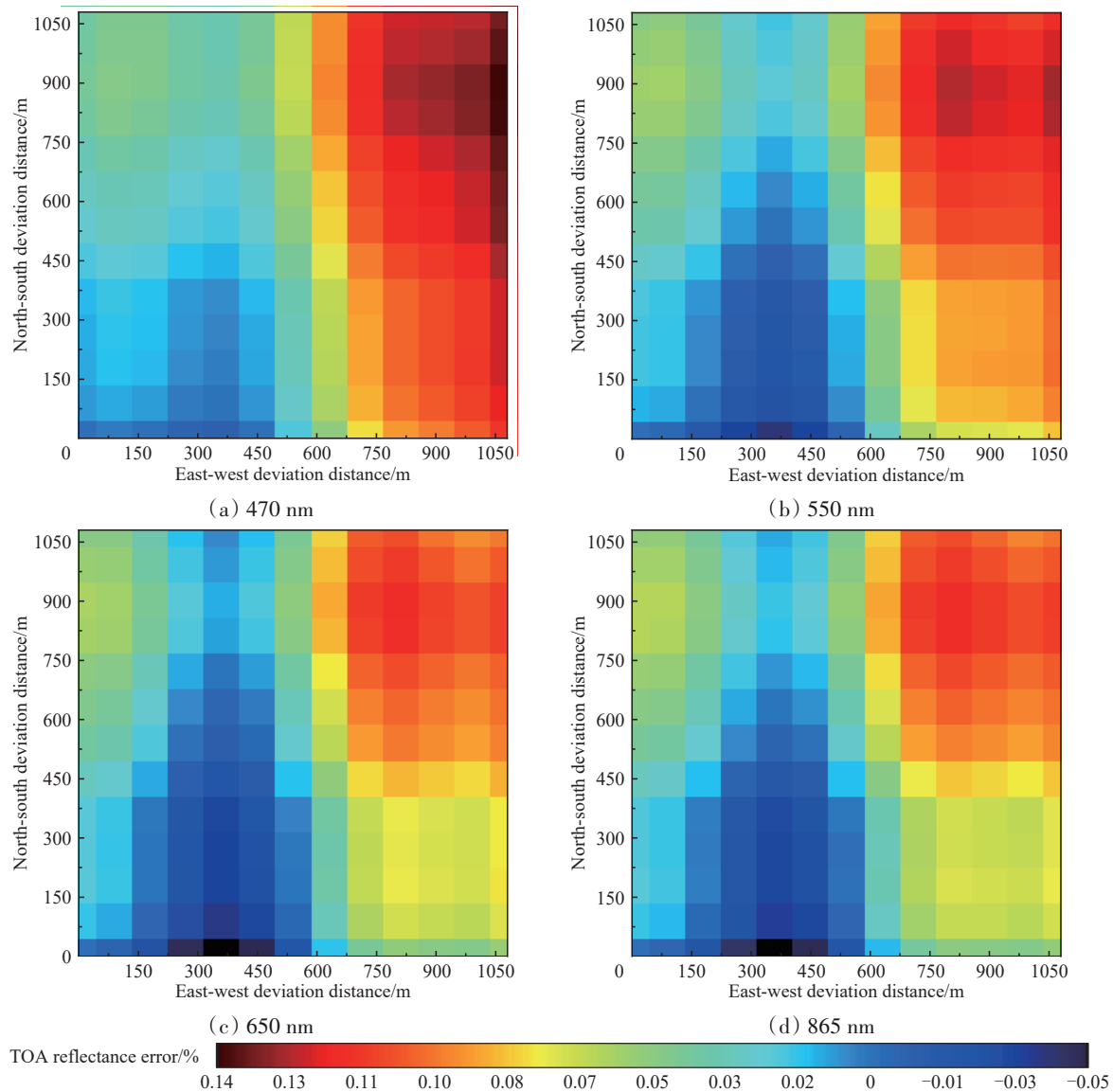


图 19 利比亚场地 TOA 误差分布地图
Fig. 19 TOA reflectance error map for the Libya

4.4 光谱不确定性

如图 20 所示, MERSI-II 与 MODIS 为光谱通道设置相近的卫星遥感器, 但是两者光谱响应也无法做到完全吻合, 会引入无法忽略的光谱不确定性, 需要采用 SBAF 订正。

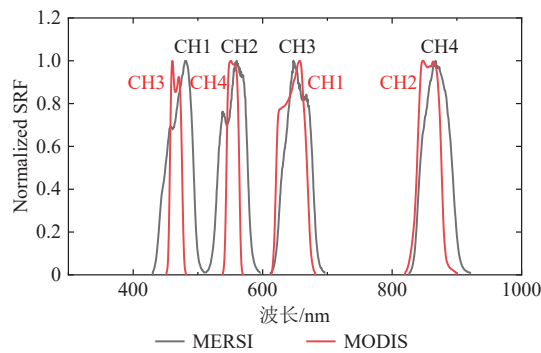


图 20 MERSI-II 与 MODIS 对应通道归一化的光谱响应分布
Fig. 20 The normalized spectral response function of the first four bands of MERSI-II and MODIS

利用 6SV 矢量模型模拟利比亚场地太阳反射波段的反射光谱, 采样间隔插值到 1 nm, 在研究确定的几何及大气约束范围内改变输入参量, 多次模拟 TOA 反射光谱数据。将模拟出的光谱数据分别与插值到 1 nm 间隔的 MERSI-II 和 MODIS 对应通道光谱响应函数进行卷积, 将二者比值拟合得到 SBAF, 对比订正后的模拟 TOA 反射率与真值间的差异, 得到光谱不确定性。最终表 2 结果显示, 订正后各波段光谱不确定性显著降低, 除 550 nm 波段由于两载荷光谱差异较大, 不确定性达 0.58%, 其余波段光谱不确定性均在 0.5% 以下。

表 2 MODIS 与 MERSI-II 经线性回归的光谱匹配因子及光谱订正前后光谱不确定性情况

Table 2 SBAF calculated by linear regression between MERSI-II and MODIS TOA reflectance, and the spectral uncertainty before and after adjustment

通道/nm	SBAF	订正前不确定性/%	订正后不确定性/%
470	1.008	1.036	0.462
550	0.9799	2.137	0.582
650	1.008	0.773	0.135
865	0.9899	1.114	0.133

4.5 定标方案与定标结果

基于上述敏感性分析, 表 3 给出了最后确定的 MODIS 与 MERSI-II 基于利比亚传递定标的最佳匹配约束和过滤方案。基于该方案, 对 2020 年两遥

感器过境利比亚数据统计分析, 结果如图 21 所示, 在时间匹配约束下, 共产生 138 对观测匹配文件, 除 8 月数据较少外, 基本在每月呈平均分布。在此匹配文件基础上逐项增加约束条件, 最终全年可筛选出 7 次匹配数据, 可以看出几何约束在筛选过程中影响最大, 尤其是对观测天顶角与相对方位角的限制, 往往成为部分月份无法产生匹配对的主要原因。

表 3 MODIS 与 MERSI-II 基于利比亚场地定标的卫星数据匹配阈值

Table 3 Flags constructed from MODIS and MERSI-II satellite data to select valid matches for inter-calibration analysis of Libya

类别	阈值名	变量名	限制条件
几何	太阳天顶角	θ_s^{TAR}	$\theta_s^{\text{TAR}} < 40^\circ$
	太阳天顶角差	$\Delta\theta_s$	$\Delta\theta_s = 6^\circ$
	观测天顶角	θ_e^{TAR}	$\theta_e^{\text{TAR}} < 40^\circ$
	观测天顶角差	$\Delta\theta_e$	$\Delta\theta_e = 7^\circ$
	相对方位角	$\varphi_{\text{phi}}^{\text{TAR}}$	$ \varphi_{\text{phi}}^{\text{TAR}} > 120^\circ$
	相对方位角差	$\Delta\varphi_{\text{phi}}$	$\Delta\varphi_{\text{phi}} = 15^\circ$
大气	气溶胶厚度	AOD550	$\text{AOD550} < 0.39$
	过境时间差	Δt	$\Delta t < 1\text{h}$
空间	空间均匀性	σ	$\sigma < 0.02$
	云掩膜	None	$\rho > 0.65$

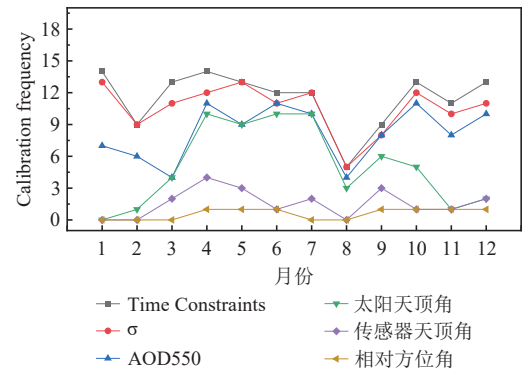


图 21 2020 年观测数据约束与过滤情况
Fig. 21 Constraint and filtering of observation data in 2020

选取利比亚 2020 年 9—12 月的定标数据, 以 MODIS 为参考对 MERSI-II 进行传递定标, 并与 MERSI-II 业务定标进行比对, 结果如图 22 所示, 图中, 绿线为 MERSI-II 自身业务定标情况, 红线为传递定标方法得到匹配点拟合的定标结果, 定标频次平均可达每月一次, 各通道定标回归相关系数在 0.99 左右, 拟合效果稳定, 各波段定标一致性采用平均绝对百分比差异 (MAPD) 评估, 分别为 0.86%, 0.57%, 1.48% 以及 1.02%。

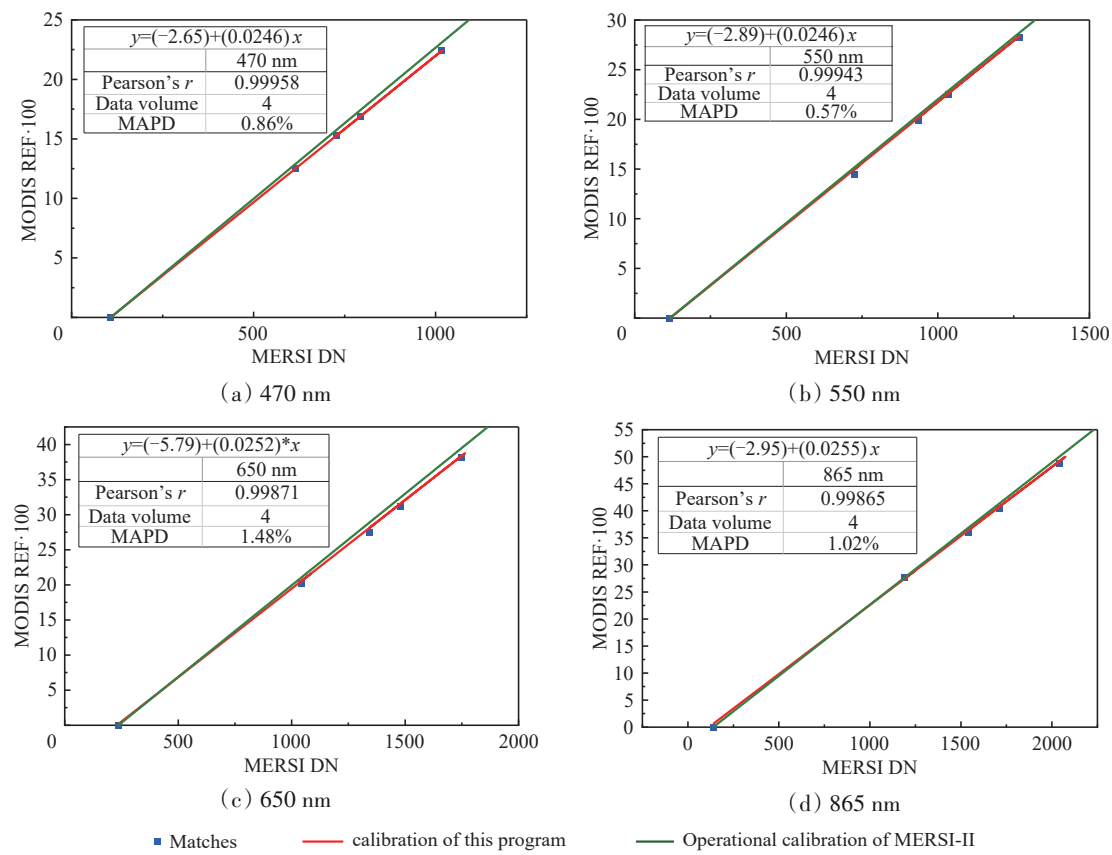


图 22 各太阳反射波段定标对比

Fig. 22 Comparison of the calibration for each solar reflection band

最终方案传递定标总不确定性由统计平方公差法求解。

$$U_{\text{total}} = \sqrt{(U_{\text{spa}}^2) + (U_{\text{temp}}^2) + (U_{\text{spec}}^2) + (U_{\text{ang}}^2)} \quad (21)$$

最终不确定性结果如表 4 ($k=1$) 所示。结果显示, 470 nm 波段对各项因素引入的不确定性更为敏感, 以其为目标波段确定传递定标约束条件基本可以使其他太阳反射波段满足要求。本研究方案可以有效限制方法中引入的匹配不确定性, 保证传递定标精度优于 1.5%, 与 Chander 等 (2013a) 确定的最优情况下, 太阳反射波段传递定标不确定性为 1% 左右相符。

表 4 各项不确定性总结

Table 4 Summary of the different sources of uncertainty				
	1/%			
波段	470 nm	550 nm	650 nm	865 nm
U_{ang}	0.85	0.47	0.45	0.39
U_{time}	1	0.2	0.8	0.7
U_{spa}	0.15	0.14	0.1	0.1
U_{spec}	0.46	0.58	0.13	0.13
U_{total}	1.4	0.79	0.93	0.82

5 结 论

研究提出了一种适合于反射波段的传递定标方法及其不确定性分析方案, 以 FY-3D MERSI-II 以及 AQUA MODIS 为例进行传递定标, 选取利比亚场地作为观测目标, 综合大气辐射传输模型与 BRDF 模型构建不确定性分析模型, 通过 MCM 多次模拟分析。从几何、时间、空间 3 个方面通过不确定性的敏感性分析确定了能产生足够匹配数据且蓝色波段不确定性小于 1% ($k=1$) 的各项匹配阈值。

通过敏感性分析可知, 场地交叉定标过程各项匹配约束的阈值与不确定性间存在明显的联系。太阳天顶角以及观测天顶角对 TOA 反射率的敏感性分析表明, 在观测天顶角小于 40° , 太阳天顶角小于 40° , 相对方位角大于 120° , 下 $\Delta\theta_s = 6^\circ$, $\Delta\theta_v = 7^\circ$, $\Delta\varphi = 15^\circ$ 的几何窗口所引入的不确定性在 1% 以内。卫星观测时间差内气溶胶变化量很难估计, 但是通过限制观测时大气中的气溶胶厚度保证匹配时天气晴朗, 在多次模拟后得出当限制气溶胶

厚度小于0.39时可保证不确定性在1%以内。场地空间均匀性相对于定位误差的敏感性分析表明两者之间有较强的正相关性,且均匀性小于0.02时可以将空间不确定性限制在0.2%以内。在以上约束阈值条件下实际蓝色波段场地交叉定标方法的总不确定性低于1.5%。

本方法以中分辨率气象海洋卫星为实例开展分析,但是方法中的各项约束条件、不确定性分析方案,以及通过不确定性分析确定定标阈值的方法可以适用于所有极轨卫星。为了尽可能减小传递定标过程中的不确定性,方法限制了较为严格的几何约束条件,导致方法定标频次无法得到保证,尤其是方法中固定阈值的设置,往往会滤除部分优质匹配数据(如在较大天顶角情况下,存在角度差很小的匹配数据)。未来工作可以设置动态阈值,避免此类情况,增加匹配频次。

志 谢 文中使用的MODIS观测数据与相关地表大气产品均来源于NASA的LAADS DAAC网站,OLI观测数据来源于USGS数据分发网站,AERONET数据来源于GSFC数据分发网站,在此表示感谢!

参考文献(References)

- Bhatt R, Doelling D, Wu A S, Xiong X X, Scarino B, Haney C and Gopalan A. 2014. Initial stability assessment of S-NPP VIIRS reflective solar band calibration using invariant desert and deep convective cloud targets. *Remote Sensing*, 6(4): 2809-2826 [DOI: 10.3390/rs6042809]
- Chander G, Helder D L, Aaron D, Mishra N and Shrestha A K. 2013c. Assessment of spectral, misregistration, and spatial uncertainties inherent in the cross-calibration study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1282-1296 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228008]
- Chander G, Hewison T J, Fox N, Wu X Q, Xiong X X and Blackwell W J. 2013b. Overview of intercalibration of satellite instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1056-1080 [DOI: 10.1109/tgrs.2012.2228654]
- Chander G, Mishra N, Helder D L, Aaron D B, Angal A, Choi T, Xiong X X and Doelling D R. 2013a. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for cross-calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1267-1281 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228007]
- Chen J, He X Q, Liu Z L, Xu N, Ma L L, Xing Q G, Hu X Q and Pan D L. 2020. An approach to cross-calibrating multi-mission satellite data for the open ocean. *Remote Sensing of Environment*, 246: 111895 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111895]
- Fox N, Green P, Brindley H, Russell J, Smith D, Lobb D, Cutter M and Barnes A. 2017. Traceable radiometry underpinning terrestrial and heliostudies (truths): a benchmark mission for climate//Proceedings Volume 10563, International Conference on Space Optics. Tenerife: SPIE: 635-643 [DOI: 10.1117/12.2304220]
- Fox N, Kaiser-Weiss A, Schmutz W, Thome K, Young D, Wielicki B, Winkler R and Woolliams E. 2011. Accurate radiometry from space: an essential tool for climate studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1953): 4028-4063 [DOI: 10.1098/rsta.2011.0246]
- Gong H, Tian G L, Yu T, Gu X F, Gao H L and Li X Y. 2010. Vicarious radiometric calibration and validation of CBERS02B CCD data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 14(1): 1-12 (巩慧, 田国良, 余涛, 顾行发, 高海亮, 李小英. 2010. CBERS02B 卫星 CCD 相机在轨辐射定标与真实性检验. *遥感学报*, 14(1): 1-12) [DOI: 10.11834/jrs.20100101]
- Gorroño J, Banks A C, Fox N P and Underwood C. 2017. Radiometric inter-sensor cross-calibration uncertainty using a traceable high accuracy reference hyperspectral imager. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130: 393-417 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.002]
- Hewison T J, Wu X Q, Yu F F, Tahara Y, Hu X Q, Kim D and Koenig M. 2013. GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1160-1170 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2238544]
- Huang H L, Yi W N, Qiao Y L and Du L L. 2012. On orbit radiometric calibration for mapping Satellite-1 sensor. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 16(S1): 22-27 (黄红莲, 易维宁, 乔延利, 杜丽丽. 2012. “天绘一号”卫星在轨辐射定标方法. *遥感学报*, 16(S1): 22-27) [DOI: 10.11834/jrs.20120005]
- Lacherade S, Fournie B, Henry P and Gamet P. 2013. Cross calibration over desert sites: description, methodology, and operational implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1098-1113 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2227061]
- Li X W, Gao F, Chen L Z and Strahler A H. 1999. Derivation and validation of a new kernel for kernel-driven BRDF models//Proceedings Volume 3868, Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications. Florence: SPIE: 368-379 [DOI: 10.1117/12.373123]
- Liu J J, Li Z, Qiao Y L, Liu Y J and Zhang Y X. 2004. A new method for cross-calibration of two satellite sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23): 5267-5281 [DOI: 10.1080/01431160412331269779]
- Lu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lü D R, Zhang P, Hu X Q, Zhou C H, You Z, Fang J C, Gong J Y, Jiang X W, Li J J, Ma L L and Xu N. 2020. Introduction of the radiometric benchmark satel-

- lite being developed in China for remote sensing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(6): 672-680 (卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜. 2020. 中国空间辐射测量基准技术. *遥感学报*, 24(6): 672-680) [DOI: 10.11834/jrs.202020011]
- Min X J, Wang Z M, Fu Q Y and Gu Y Q. 2002. Ground simultaneous measurements and analysis of radiometric characterization of Dunhuang test site for calibrating CBERS-1 sensors. *Geo-Information Science*, (3): 43-50 (闵祥军, 王志民, 傅俏燕, 顾英圻. 2002. CBERS-1 CCD 相机飞行绝对辐射标定试验地面同步测量与场地辐射特性分析. *地球信息科学*, (3): 43-50) [DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2002.03.008]
- Mittaz J, Merchant C J and Woolliams E R. 2019. Applying principles of metrology to historical Earth observations from satellites. *Metrologia*, 56(3): 032002 [DOI: 10.1088/1681-7575/ab1705]
- Ohring G, Wielicki B, Spencer R, Emery B and Datla R. 2005. Satellite instrument calibration for measuring global climate change: report of a workshop. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(9): 1303-1314 [DOI: 10.1175/bams-86-9-1303]
- Sun L, Hu X Q, Guo M H and Xu N. 2013. Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3(4): 84-96 (孙凌, 胡秀清, 郭茂华, 徐娜. 2013. 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. *气象科技进展*, 3(4): 84-96) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.009]
- Wielicki B A, Young D F, Mlynczak M G, Thome K J, Leroy S, Corliss J, Anderson J G, Ao C O, Bantges R, Best F, Bowman K, Brindley H, Butler J J, Collins W, Dykema J A, Doelling D R, Feldman D R, Fox N, Huang X, Holz R, Huang Y, Jin Z, Jennings D, Johnson D G, Jucks K, Kato S, Kirk-Davidoff D B, Knuteson R, Kopp G, Kratz D P, Liu X, Lukashin C, Mannucci A J, Phanamongkolkij N, Pilewskie P, Ramaswamy V, Revercomb H, Rice J, Roberts Y, Roithmayr C M, Rose F, Sandford S, Shirley E L, Smith W L, Soden B, Speth P W, Sun W, Taylor P C, Tobin D and Xiong X. 2013. Achieving climate change absolute accuracy in orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10): 1519-1539 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00149.1]
- Wilson R T. 2013. Py6S: a Python interface to the 6S radiative transfer model. *Computers and Geosciences*, 51: 166-171 [DOI: doi: 10.1016/j.cageo.2012.08.002]
- Wu A S, Xiong X X, Doelling D R, Morstad D, Angal A and Bhatt R. 2013. Characterization of terra and aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR spectral bands' calibration stability. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(7): 4330-4338 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2226588]
- Wu X Q, Hewison T and Tahara Y. 2009. GSICS GEO-LEO intercalibration: baseline algorithm and early results//*Proceedings Volume 7456, Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization V: Readiness for GEOSS III*. San Diego: SPIE: 25-36 [DOI: 10.1117/12.825460]
- Xiong X X, Sun J Q, Xie X B, Barnes W L and Salomonson V V. 2010. On-orbit calibration and performance of aqua MODIS reflective solar bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(1): 535-546 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2024307]
- Zhang P, Lu N M, Li C R, Ding L, Zheng X B, Zhang X J, Hu X Q, Ye X, Ma L L, Xu N, Chen L and Schmets J. 2020. Development of the Chinese space-based radiometric benchmark mission LIBRA. *Remote Sensing*, 12(14): 2179 [DOI: 10.3390/rs12142179]
- Zhang Y X, Qiu K M, Hu X Q, Rong Z G and Zhang L J. 2004. Vicarious radiometric calibration of satellite FY-1D sensors at visible and near infrared channels. *Acta Meteorologica Sinica*, 18(4): 505-516

Cross calibration over sites and uncertainty assessment for reflective solar bands

HU Qi¹, HE Yuqing¹, XU Na^{2,3}, HE Xingwei^{2,3}, WANG Ling^{2,3}, WANG Qian^{2,3}, HU Xiuqing^{2,3}, HU Bin¹, XU Hanlie^{2,3}

1. MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

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

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

Abstract: The stability of Pseudo-Invariant Calibration Sites (PICS) contributes significantly to the improvement in calibration accuracy. The number of PICS is increasing as the work continues to advance. Therefore, the frequency of cross calibrations based on dessert sites has been significantly increased. Establishing a generic site-based cross calibration and uncertainty analysis method is necessary to confirm calibration uncertainties for different sites. Our study aims to improve the overall accuracy of satellite remote sensor observations by

developing a cross calibration method over desert sites. In this study, a cross calibration and uncertainty assessment scheme aiming at solar bands is described, and the optimal matching scheme of the cross calibration is given by sensitivity analysis of the uncertainty.

With image data of Libya sites from MODIS and MERSI-II, the main uncertainty contributors are found in the geometric, temporal, spatial, and spectral domains. For the four aspects, the uncertainty analysis model is independently constructed using the atmospheric radiative transfer model and the bi-directional reflectance distribution function. The sensitivity of each matching condition to the effect of uncertainty is multiplied and simulated by Monte Carlo method.

The geometric and atmospheric distribution patterns of satellite matching data are summarized, which is conducted through statistically analyzing the matching data of MODIS and MERSI-II over Libya sites in 2020. The probability distribution density of the matching condition is used as the input condition, and the discrete distribution of the relative deviation of Top-Of-Atmosphere (TOA) reflectance is obtained by the uncertainty analysis model. The standard deviation of the distribution of relative deviations of TOA reflectance is statistically considered the standard uncertainty. After independent analysis of each factor of uncertainty, the total uncertainty is obtained by the Root-Sum-Squared method.

The total uncertainty of each channel could be controlled under 1.5% (at) when the difference in sensor zenith angles between the two remote sensors is than $\pm 7^\circ$, the difference between the solar zenith angles is less than $\pm 6^\circ$, the aerosol thickness is less than 0.39, and the uniformity of the observation site is less than 0.02. The results between the MODIS reflectance and the digital number recorded by MERSI reveal a good linear relationship. This cross calibration result also has an accuracy in the range of 0.5%—1.5% for each band compared with operational calibrations. Although we only applied the algorithm to MERSI-II as a demonstration, our algorithm is applicable to other sensors with few modifications.

Key words: remote sensing, uncertainty, cross calibration, Monte Carlo method, reflection band, medium resolution imaging spectroradiometer

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504800, 2018YFB0504805)