

# 沙漠稳定目标方向反射率参考模型构建

王玲, 胡秀清, 徐娜, 陈林, 张鹏, 徐寒列

1. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 中国气象局, 北京 100081;
2. 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 中国气象局, 北京 100081;
3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

**摘要:** 陆地稳定目标的地表反射率是利用反射率基法对卫星传感器进行辐射定标的关键参量。但对于国产历史遥感卫星的光学载荷, 同步观测的稳定目标地表反射率数据的缺乏, 是对其进行历史再定标工作的主要难点。本文基于长时间序列的MODIS BRDF模型参数产品, 采用统计分析的方法, 建立了全球典型沙漠稳定目标的逐月方向反射率参考模型, 并基于独立的样本数据进行了模型精度验证及辐射定标应用示范研究。验证结果显示, 国外目标的方向反射率参考模型不确定度优于国内目标。国外的13个沙漠目标中, 有12个目标的模型误差在 $\pm 3\%$ 以内, 其中Libya 4可低于 $\pm 1\%$ ; 在国内, 有6个目标与国外这12个目标的模型精度相当。辐射定标应用示范结果显示, 本文构建的稳定目标方向反射率参考模型可以代替实时的MODIS BRDF模型参数产品用于遥感仪器的辐射定标中。一方面, 可以解决国产卫星光学载荷历史数据再定标中缺乏地面反射率同步观测的问题; 另一方面, 对于在轨遥感仪器的辐射定标, 可避免频繁下载MODIS BRDF模型参数产品的问题。

**关键词:** 遥感仪器, 辐射定标, 反射率, BRDF, 稳定目标, MODIS

**中图分类号:** TP701/P2

**引用格式:** 王玲, 胡秀清, 徐娜, 陈林, 张鹏, 徐寒列. 2023. 沙漠稳定目标方向反射率参考模型构建. 遥感学报, 27(10): 2270-2282  
Wang L, Hu X Q, Xu N, Chen L, Zhang P and Xu H L. 2023. Construction of directional reflectance reference model for desert stable earth targets. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2270-2282 [DOI: 10.11834/jrs.20221587]

## 1 引言

卫星仪器在轨运行期间辐射定标的方法主要有天上定标和在轨替代定标。在轨替代定标方法中, 使用准不变定标场(即稳定目标场地)对卫星传感器进行辐射定标和性能跟踪已经成为国际上越来越受欢迎的定标手段(Govaerts等, 2004; Helder等, 2013; Mishra等, 2014; Wang等, 2018)。

国际地球观测卫星委员会(CEOS)的定标与真实性检验工作组(WGCV)在全球范围内选取了一系列辐射稳定且空间分布均匀的目标场地, 这些场地被广泛用于卫星传感器反射太阳波段的绝对辐射定标或辐射响应稳定性评估(Cosnefroy等, 1996; Teillet等, 2007; Wu等, 2008; 王玲等, 2017)。最早推荐使用的稳定目标由8个有仪器观测的场地, 称为LANDNET和6个无仪器观测的准不

变定标场PICS (Pseudo-Invariant Calibration Sites), 这些场地大多位于难以到达的宽广沙漠地区和极地冰川地区。Teillet和Chander (2010)对已有的稳定目标场地进行了补充, 列出了全球36个潜在的可用于卫星仪器在轨辐射定标的稳定目标场地。国内已建成的有仪器观测的辐射定标场地除敦煌和青海湖外, 还有内蒙古的包头定标场、云南丽江可见光定标场等。此外, 胡秀清等(2020)和王玲等(2019)基于长时间序列的卫星遥感观测数据, 通过时间稳定性、空间均匀性和不变像元等指标在中国西北和青藏高原永久冰川区域识别出了32个沙漠类型准不变定标场和5个冰川准不变定标场。

利用稳定目标进行绝对辐射定标时, 卫星过境时刻遥感仪器观测方向的目标地表方向反射率是关键参数之一。目标的方向反射率获取方式有两种, 一种是野外地面测量, 另一种是卫星遥感

收稿日期: 2021-09-07; 预印本: 2022-03-01

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504900, 2018YFB0504901); 国家自然科学基金(编号: 41871249, 42001312)

第一作者简介: 王玲, 研究方向为卫星传感器可见-近红外通道辐射定标。E-mail: lingw@cma.gov.cn

通信作者简介: 胡秀清, 研究方向为卫星遥感定标理论及方法、遥感反演科学算法和遥感大数据应用。E-mail: huxq@cma.gov.cn

产品。野外地面测量的方式虽然能获取高精度的地表反射率，但是对于分布在无人居住的沙漠，或是极地地区的冰川等稳定目标，地面测量数据获取相对困难。卫星遥感技术具有大面积快速获取地表反射率数据的优势，可以避免地面测量对场地破坏，是获取全球范围内的多个稳定目标，尤其通达性较差的稳定目标地表反射率的来源。其中，MODIS BRDF模型参数产品使用最为广泛，产品精度已在全球范围得到了广泛地分析和验证(Liang等, 2002; Liu等, 2009; 朱高龙等, 2011; Román等, 2013)。因此，近年来发展了一种无需地面同步观测的多场地定标方法(Wang等, 2018)，该方法采用MODIS BRDF模型参数产品作为稳定目标地表方向反射率数据的来源。但是，对于MODIS未发射的时期(1999年之前)，或者当MODIS BRDF模型参数产品反演质量不佳或没有反演结果时，将无法使用该方法开展遥感仪器的辐射定标工作。鉴于此问题，本文采用长时间序列的MODIS 500 m空间分辨率的BRDF模型参数产品——MCD43A1，研究其地表BRDF模型参数的时变规律，基于统计分析方法构建其地表方向反射率模型，作为稳定目标地表特性的先验知识库，实现不用下载MODIS BRDF模型参数产品也可以获得稳定目标的地表方向反射率。继之，文章基于独立的样本数据对构建的地表方向反射率模型精度进行了验证。最后，为了验证该模型在辐射定标中的适用性，以搭载在气象卫星风云三号C星(FengYun-

3C, FY-3C)上的光学载荷—可见光红外扫描辐射计VIRR(Visible Infrared Radiometer)为例，基于该模型开展了辐射定标应用示范研究，并与传统的多场地方法(即，使用实时的MODIS BRDF模型参数产品估算目标的地表方向反射率)的定标结果进行了比对分析。

## 2 稳定目标场地介绍

本文从文献(Teillet和Chander, 2010; Hu等, 2020)和CEOS网站公布的地球稳定目标中，根据目标的空间均匀性、时间稳定性、反射率大小以及地域代表性等方面，进一步挑选出了26个沙漠稳定目标。在目标选取时，首先将国内外目标分开考虑；然后分别针对国内外目标，采用相同的选取标准进行目标选取。目标选取标准如下，(1)去除面积较小的目标(小于10 km<sup>2</sup>)；(2)根据目标的反射率大小将目标分成高反射率目标(650 nm反射率>0.4)，中等反射率目标(0.4—0.3)和低反射率目标(<0.3)3类；(3)针对每一类目标，从中选取空间均匀性和时间稳定性较好的前4—5个目标，并且选取的目标最好在空间上均匀分布，即不能都集中在某一个地区。最终，国内的沙漠目标选取了13个，均匀地分布在新疆塔卡拉玛干沙漠、甘肃的戈壁、内蒙古沙漠和柴达木盆地，每个地区约3—4个目标。国外的沙漠目标也选取了13个，主要分布在非洲、中东、北美和澳大利亚沙漠戈壁地区，其位置等信息如表1所示。

表1 国内外沙漠稳定目标列表

Table 1 List of global stable earth targets

国内目标							国外目标					
序号	缩写	中文名称	纬度/°N	经度/°E	MODIS title	地区	序号	名称	纬度/°N	经度/°E	MODIS title	地区
1	DAZH_W	大灶火_西	36.58	93.80	h25v5	青海	1	Libya 4	28.55	23.39	h20v6	非洲
2	LBPO_W	罗布泊湖_西	40.14	89.12	h24v4	新疆	2	Mauritania 1	19.40	-9.30	h17v7	非洲
3	XCDH_W	小柴旦湖_西	37.42	95.07	h25v5	青海	3	Mauritania 2	20.85	-8.78	h17v6	非洲
4	WULBHE	乌兰布和	39.67	106.17	h26v5	内蒙	4	Algeria 3	30.32	7.66	h18v5	非洲
5	TKLM_5	塔卡拉玛干_5	39.17	85.00	h24v5	新疆	5	Libya 1	24.42	13.35	h19v6	非洲
6	TKLM_1	塔卡拉玛干_1	39.57	85.09	h24v5	新疆	6	Algeria 5	31.02	2.23	h18v5	非洲
7	TKLM_3	塔卡拉玛干_3	40.13	81.43	h24v4	新疆	7	Sonora	31.95	-114.1	h8v5	墨西哥
8	TNGR_2	腾格里_2	38.10	103.99	h26v5	内蒙	8	Arabia1	18.88	46.76	h22v7	中东
9	TNGR_1	腾格里_1	38.50	103.75	h26v5	内蒙	9	Arabia2	20.13	50.96	h22v6	中东
10	BDJL_2	巴丹吉林_2	40.25	101.75	h25v4	内蒙	10	Mali	19.12	-4.85	h17v7	非洲
11	BDJL_1	巴丹吉林_1	40.26	100.68	h25v4	内蒙	11	Sudan1	21.74	28.22	h20v6	中东
12	DHUNG	敦煌	40.18	94.27	h25v4	甘肃	12	Tinga_Tingana	-29.0	139.86	h30v11	澳大利亚
13	JINT_1	金塔	40.65	100.34	h25v4	内蒙	13	Niger2	21.37	10.59	h18v6	非洲

### 3 数据与方法

#### 3.1 MODIS BRDF 模型参数产品及预处理

MODIS 的 BRDF 模型参数产品包括 MCD43A1, MCD43B1 和 MCD43C1, 其中 MCD43A1 的空间分辨率最高, 为 500 m, 是 MODIS 地表反照率产品的核心数据集, 提供了当地正午 MODIS 前 7 个波段 (460, 555, 645, 865, 1240, 1640, 2130 nm) 以及可见光 (0.3—0.7  $\mu\text{m}$ )、近红外 (0.7—5.0  $\mu\text{m}$ ) 和短波 (0.3—5.0  $\mu\text{m}$ ) 3 个宽通道处的 BRDF 核驱动模型参数, 即一个表示各向同性散射分量的系数  $f_{\text{iso}}$ , 一个表示几何光学分量的系数  $f_{\text{geo}}$  和一个表示体散射分量的系数  $f_{\text{vol}}$ 。这些数据可以从 NASA 的 LAADS DAAC 网站下载获得 ([https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/\[2021-03-01\]](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/[2021-03-01]))。用户利用这 3 个模型参数, 可以前向计算出任意入射角和观测角条件下的二向反射率 (式 1)。文中使用了前 7 个波段的 BRDF 模型参数产品进行后续的研究。

$$R(\theta, \vartheta, \phi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta, \vartheta, \varphi) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta, \vartheta, \phi) \quad (1)$$

式中,  $\theta$ 、 $\vartheta$  和  $\phi$  分别是太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角;  $K_{\text{geo}}$  和  $K_{\text{vol}}$  分别代表几何光学和体散射分量, 这两个参数只与观测角度 ( $\theta, \vartheta, \phi$ ) 有关, 具体计算分别参见 Wanner 等 (1995) 和 Roujean 等 (1992) 的文献。

MCD43A1 采用正弦投影的方式存储, 将全球分为 1200 m×1200 m 的小块, 共计 18×36 块 (tile), 每块包含 2400×2400 个像元。各个稳定目标对应的 MODIS 陆地 (MODLAND) 正弦投影编号见表 1。文中针对每个目标, 根据其对应的 MODIS 陆地正弦投影编号, 下载了 2006 年—2012 年的 MCD43A1 数据 (版本 C6)。C6 MCD43A1 是其最新版本, 时间分辨率由 C5 版本的 8 天提升到为每天。MCD43A1 产品数据的预处理主要包括, 基于 NASA 提供的 MODIS 的投影转换软件 MRT (MODIS Reprojection Tool), 将 MCD43A1 产品数据从正弦投影转换到像元大小为 0.005°×0.005°的等经纬度投影。然后, 根据沙漠目标的经纬度, 提取其中心 7×7 窗口 (3.5 km×3.5 km) 的像元数据均值作为目标模型参数的代表值。其中, 只有 BRDF 参数反演质量 (QA) 小于等于 1 的像元参与 ROI 窗口像元的平均处理。反演质量 (QA) 取值 0 表示最佳反演结果 (best quality, full BRDF inversions), 1 为好的反演结果 (good quality,

magnitude BRDF inversions), 255 为填充值 (无反演结果)。为了剔除有雪覆盖或有沙尘影响的数据, 根据沙漠目标上存在其他目标时, 其空间均匀性变差的特点, 剔除 645 nm 波段处  $f_{\text{iso}}$  值大于 0.6 或目标 ROI 区域内 645 nm 处  $f_{\text{iso}}$  标准差和均值的比大于 0.05 的数据 (即, ROI 区域内,  $f_{\text{iso}}$  标准差/ $f_{\text{iso}}$  均值 > 0.05)。

#### 3.2 沙漠稳定目标方向反射率参考模型构建

基于经过 3.1 节预处理后的 MCD43A1 数据, 针对每天的数据, 统计目标中心 7×7 像元窗口内的空间均值, 获取目标地表 BRDF 模型参数 ( $f_{\text{iso}}$ ,  $f_{\text{geo}}$  和  $f_{\text{vol}}$ ) 的日均值统计值。统计计算时只考虑反演质量 QA≤1 的像元, 如果窗口内有效像元的数量少于窗口像元总量的一半, 即 0.5×49=24.5, 该天的统计结果则认为无效, 从时间序列中去掉, 不参与下一步的分析。然后, 基于日均值的统计结果, 逐月计算月均值 (式 (2)), 如果某一个月的有效天数少于一个月实际天数的 1/3, 则该月均值统计结果认为无效, 去掉该月的统计值。最后, 针对某一个月, 基于不同年份的月均值统计结果, 计算该月份的多年均值和标准差 (式 (3)—(4)), 作为最终的目标方向反射率参考模型的参数, 如果该月份参与统计的年数少于 2 则认为该月的多年均值统计结果无效。

$$f_{x,m,y} = \frac{\sum_{d=1}^D f_{x,d,m,y}}{D} \quad (2)$$

$$\overline{f_{x,m}} = \frac{\sum_{y=1}^N f_{x,m,y}}{N} \quad (3)$$

$$\delta(f_{x,m}) = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^N (f_{x,m,y} - \overline{f_{x,m}})^2}{N-1}} \quad (4)$$

式中,  $f_{x,m,y}$  表示第  $y$  年的第  $m$  月份的 BRDF 模型参数月均值,  $m$  取值 1—12,  $y$  为 2008 年到 2012 年,  $x$  代表 iso, vol 或 geo 这 3 个分量的权重系数。 $\overline{f_{x,m}}$  表示第  $m$  月份的 BRDF 模型参数的多年月均值, 即为沙漠目标的方向反射率参考模型参数, 结合式 (1) 即可计算出任意月份, 给定观测结合下的沙漠目标的方向反射率。 $\delta(f_{x,m})$  表示不同年份对应月份的 BRDF 模型参数月均值之间的标准差。

#### 3.3 沙漠稳定目标方向反射率参考模型不确定分析

由 3.2 节可知, 沙漠目标的方向反射率参考模型涉及到 3 个参数, 为了综合评估其不确定度, 本文

根据B类不确定度的合成公式,使用式(5),来表征沙漠目标方向反射率参考模型整体的不确定度。

$$U_m = \sqrt{\delta(f_{\text{iso},m})^2 + \delta(f_{\text{vol},m})^2 + \delta(f_{\text{geo},m})^2} \quad (5)$$

式中,  $U_m$  为第  $m$  个月份方向反射率参考模型的综合不确定度,  $\delta(f_{\text{iso},m})$ ,  $\delta(f_{\text{vol},m})$  和  $\delta(f_{\text{geo},m})$  为不同年份对应  $m$  月份的BRDF模型系数月均值之间的标准差,计算方法见式(4)。

### 3.4 沙漠稳定目标方向反射率参考模型精度验证

选取了2006年—2007年的MCD43A1数据,即独立于构建方向反射率参考模型使用的样本数据,对沙漠稳定目标方向反射率参考模型的精度进行验证。采用3.2节所述的数据预处理方法,获取目标周围  $3.5 \times 3.5 \text{ km}^2$  区域内,反演质量  $QA \leq 1$  条件下的地表BRDF模型参数 ( $f_{\text{iso}}$ ,  $f_{\text{geo}}$  和  $f_{\text{vol}}$ ) 均值。根据645 nm波段处  $f_{\text{iso}}$  值和目标周围ROI区域内的空间均匀性 ( $f_{\text{iso}}$  标准差/ $f_{\text{iso}}$  均值) 作为判据,从验证样本中剔除有雪覆盖或有沙尘影响的数据。由式(1)可知,对于给定观测几何条件下,沙漠目标的地表方向反射率取决于3个BRDF模型参数,因此目标的地表方向反射率精度可间接地反映BRDF模型参数的精度。据此,本文将基于多年统计平均获得的方向反射率参考模型计算的地表反射率与基于实时的MCD43A1产品计算的地表反射率进行对比分析,来验证方向反射率参考模型的精度。首先,根据验证样本的观测时间,选取对应月份的方向反射率参考模型参数,基于式(1)计算典型观测条件下(观测天顶角  $0^\circ$ , 太阳天顶角  $45^\circ$ , 相对方位角  $0^\circ$ ) 目标的地表反射率;然后,根据当天的MCD43A1产品提供的BRDF模型参数,基于式(1)计算目标实际的地表反射率,作为验证参考;最后,将以上两种方式获得的地表反射率进行比较,基于式(6)—(8)计算两者之间的相对偏差均值和相对偏差的标准差。

(1) 相对偏差均值MRB (Mean Relative Bias)

$$\text{MRB} = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - R_i) / R_i}{N} \quad (6)$$

(2) 相对偏差的标准差STD (standard deviation)

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RB_i - \overline{RB_i})^2}{N - 1}} \quad (7)$$

$$RB_i = \frac{M_i - R_i}{R_i} \quad (8)$$

式中,  $N$  为验证样本的数量,  $M_i$  和  $R_i$  分别是第  $i$  个验证样本,基于方向反射率参考模型计算的地表反射率和基于实时的MCD43A1产品计算的地表反射率,  $RB_i$  为第  $i$  个验证样本的两种地表反射率的相对偏差。

## 4 结果分析

### 4.1 沙漠稳定目标地表BRDF模型参数多年月均值

图1给出的是基于MODIS BRDF模型参数日产品MCD43A1,统计计算得到的2008年—2012年期间,国内外沙漠稳定目标在645 nm波段处的地表BRDF模型参数—— $f_{\text{iso}}$ ,  $f_{\text{vol}}$  和  $f_{\text{geo}}$  月均值。其中,  $f_{\text{iso}}$  分量相当于白空反照率,反映了目标反射率大小。国内沙漠目标在645 nm处的  $f_{\text{iso}}$  为0.22—0.38,国外沙漠目标为0.38—0.53,说明大部分的国外沙漠稳定目标的反射率高于国内沙漠稳定目标。因此在稳定目标辐射定标应用中,联合使用国内外沙漠稳定目标,有助于增大遥感仪器辐射定标的动态范围。在国内沙漠稳定目标中,青海省柴达木盆地处的沙漠目标  $f_{\text{iso}}$  值高于其他地区的沙漠目标,其中小柴旦湖西(XCDH\_W)沙漠目标的  $f_{\text{iso}}$  最大,其次是大灶火西(DAZH\_W)。内塔1(JINT\_1)和巴丹吉林1(BDJL\_1)的  $f_{\text{iso}}$  值最小为0.2。国外沙漠目标中,非洲的Libya1和Mali的  $f_{\text{iso}}$  值最高,墨西哥的Sonora的  $f_{\text{iso}}$  值最小,与国内青海省的沙漠目标  $f_{\text{iso}}$  值接近。就体散射分量系数  $f_{\text{vol}}$  而言,国内外目标大致处于相同量级,在0.05—0.2之间,但国内目标的季节性波段略高于国外目标。就几何光学分量系数  $f_{\text{geo}}$  而言,国内的XCDH\_W和DZAH\_E的几何光学散射分量  $f_{\text{geo}}$  最大,在0.02—0.03之间,国内其他目标的  $f_{\text{geo}}$  与国外目标的较为接近,基本低于0.02。 $f_{\text{geo}}$  的大小一定程度上反演了目标方向反射的各向异性程度,由此可见国内的XCDH\_W和DZAH\_E两个目标的反射率的方向性高于国内外其他目标。

基于2008年—2012年BRDF模型参数的月均值,获得的各个月份BRDF模型参数的多年均值如图2所示。对比国内、外目标对应参数的多年月均值时间序列可以发现,对于  $f_{\text{vol}}$  和  $f_{\text{geo}}$  两个参数,国内目标的季节性波动大于国外目标,其中XCDH\_W, DAZH\_W和JINT\_1这3个目标的季节性波动最为明显。国内目标的季节波动大于国外目标,可能与国内外目标的气候条件不同有关,国内目标基本

位于40°N附近,属于温带大陆性气候,国外大部分目标基本位于南、北纬20°附近,属于热带沙漠气候,相较国内目标,气候更为干燥,大气湿度和土壤湿度

变化小,地表组分更为稳定,因此国外目标BRDF模型参数随时间更为稳定。对于 $f_{iso}$ 参数,除了XCDH\_W,国内外其他目标均没有明显的季节波动。

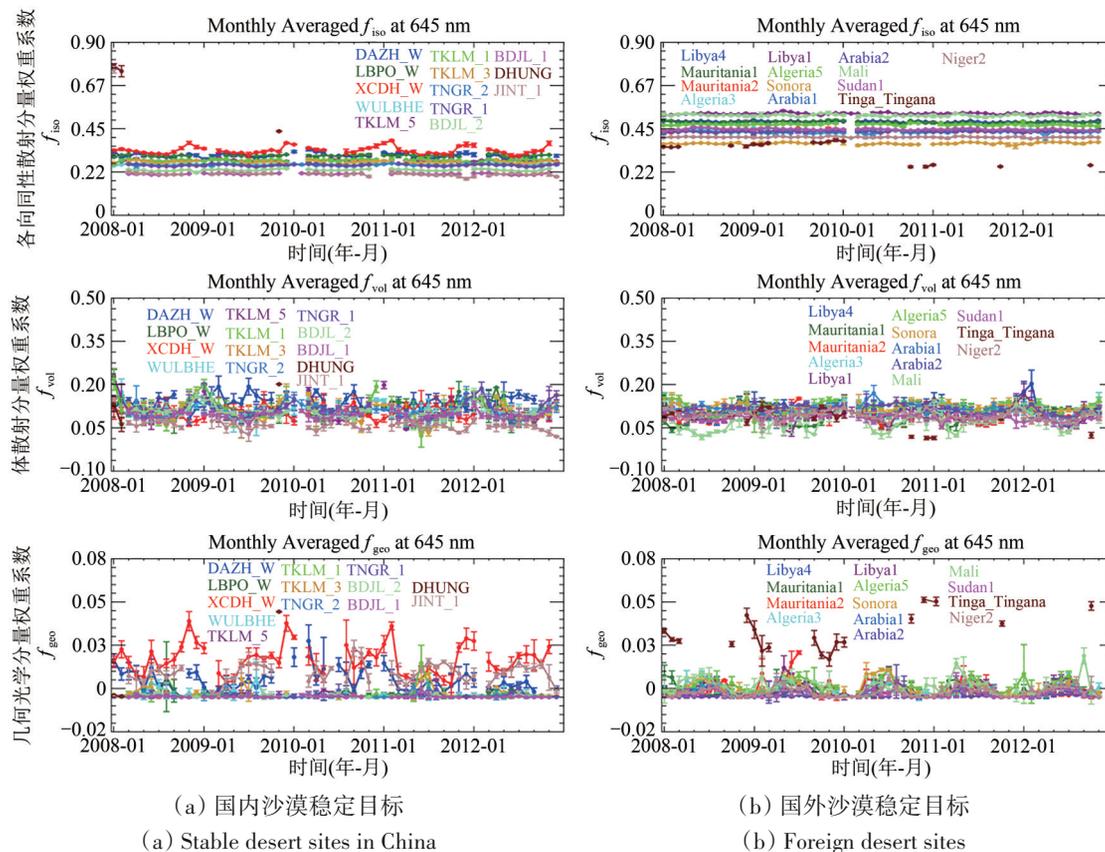


图1 基于MCD43A1获取的2008年—2012年国内外沙漠稳定目标的地表BRDF模型参数月均值和标准差(误差线)

Fig. 1 Time series of monthly average and standard deviation of the surface BRDF model parameters over global stable desert targets based on MCD43A1 from 2008 to 2012

## 4.2 沙漠稳定目标方向反射率参考模型不确定度

图2中的误差线为多年之间相同月份的BRDF模型参数的标准差,小的标准差表示不同年之间的BRDF模型系数变化小,即构建的目标方向反射率参考模型不确定度就越小。基于3个模型参数的逐月标准差,结合式(5)可以获得方向反射率参考模型的整体不确定度,结果如图3所示。由图3可以看出,相同波段处,国外目标的方向反射率参考模型不确定度低于国内目标。国外目标在所有波段处的不确定度均低于3%,其中除了Mauritania1, Arabia1和Mali这3个目标,其他10个目标均低于2%。国内目标除了TKLM\_3,其他目标在所有波段处的不确定度低于4%,其中位于腾格里和巴丹吉林的沙漠目标,以及WULBHE和JINT\_1能达到3%以下。对比同一目标在不同波段处的不确定度可以发现,蓝绿波段的不确定度小于红—近红外

波段处的不确定度。这可能与沙漠目标的反射率光谱特征有关,即蓝绿波段处的反射率低于红—短波红外处的反射率。

## 4.3 沙漠稳定目标方向反射率模型精度验证

图4和图5给出的是基于2006年—2007年的MCD43A1日产品,对沙漠目标方向反射率模型精度的验证结果。图4(a)和图4(d)分别是基于方向反射率参考模型,计算的2006年—2007年期间国内外沙漠目标在典型观测几何条件下,地表反射率的时序图;图4(b)和图4(e)分别是基于MCD43A1产品,计算的国内外沙漠目标在相同观测几何条件下的地表反射率时序图。可以看出国内外目标地表反射率序列的时间变化都较小,但国外沙漠目标的地表反射率高于国内目标。国外目标除Sonora的地表反射率为0.38外(645 nm处),

其他目标的反射率在0.4—0.58。国内目标的地表反射率基本0.4以下。图4 (c) 和图4 (f) 分别是国内外目标方向反射率参考模型的相对偏差时间序列图。可以看出，与国内目标相比，国外目标的相对偏差时序较为集中，随时间变化也较小。国外所

有目标的辐射基准相对偏差基本在±4%以内（忽略个别时间点），国内部分目标的相对偏差可集中保持在±5%以内，但有些目标，如 DAZH\_W, XCDH\_W, TKLM\_1 和 JINT\_1 的相对偏差随时间波动较大，尤其在年初和年末的时候会超过5%。

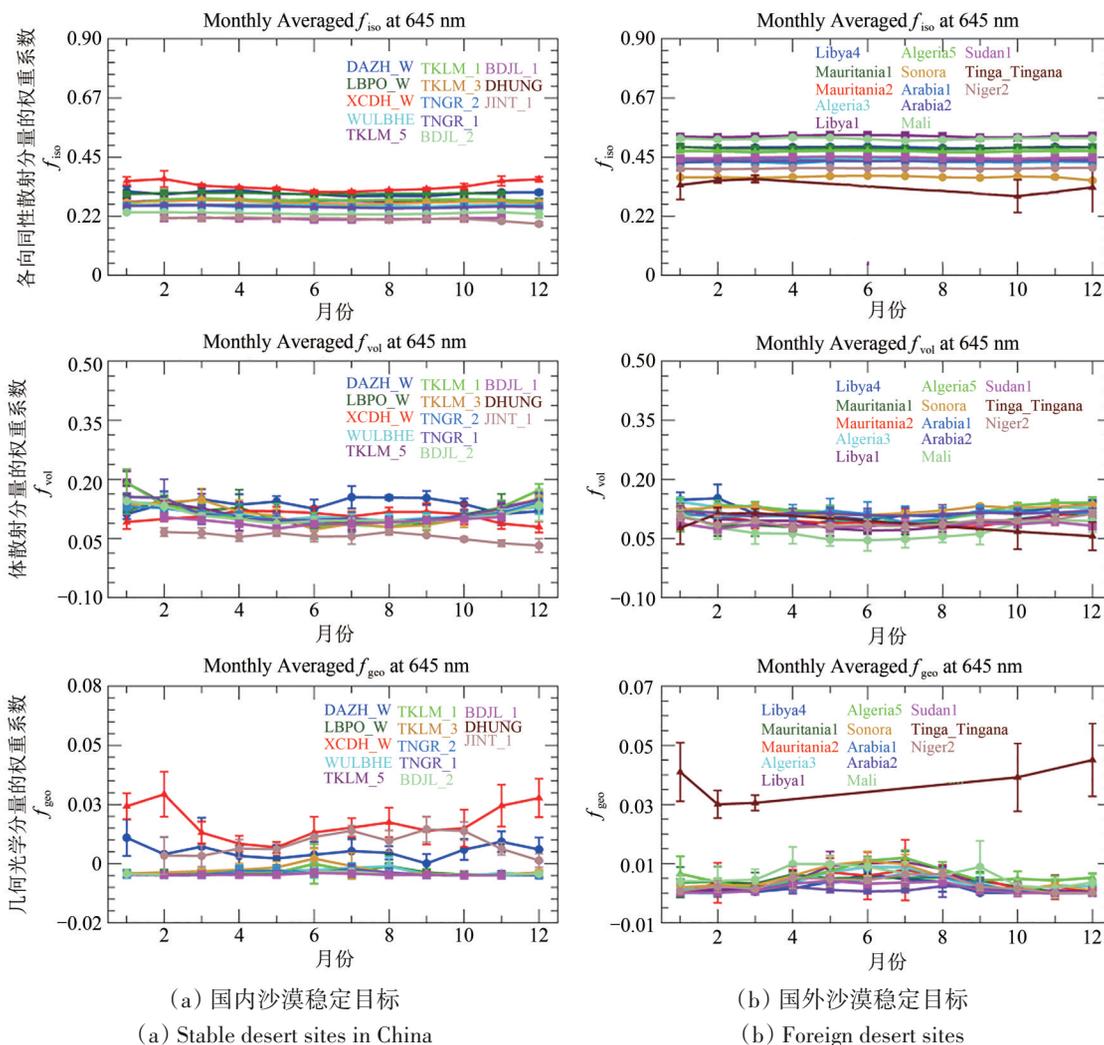


图2 基于MCD43A1获取的国内外沙漠稳定目标的地表BRDF模型参数多年月均值和标准差(2008—2012)  
 Fig. 2 Multi-year monthly average and standard deviation of the surface BRDF model parameters over global stable desert targets based on MCD43A1 (2008—2012)

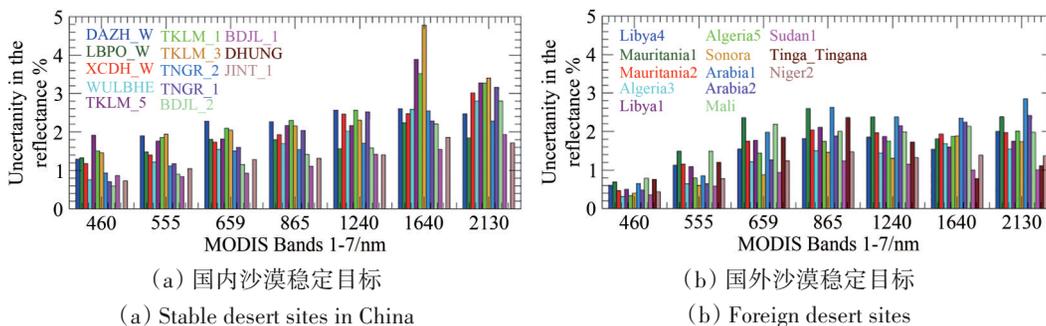
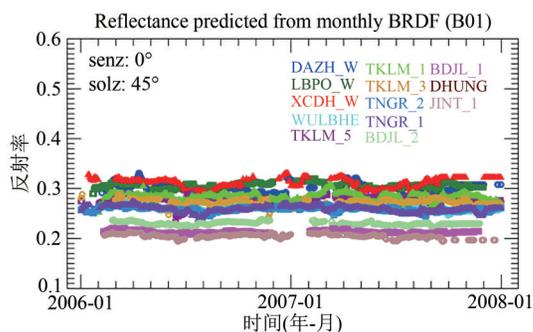
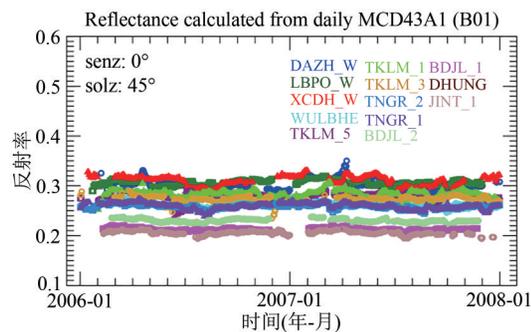


图3 国内外沙漠目标在MODIS波段1-7处辐方向反射率参考模型的不确定度  
 Fig. 3 The directional reflectance reference model uncertainty of domestic and foreign desert targets at MODIS Bands 1-7



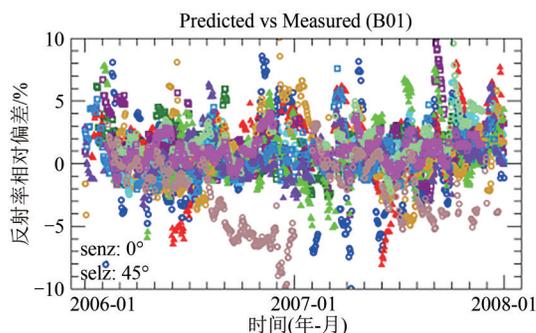
(a) 国内沙漠目标的方向反射率参考模型计算值

(a) The reflectance calculated from model for China deserts



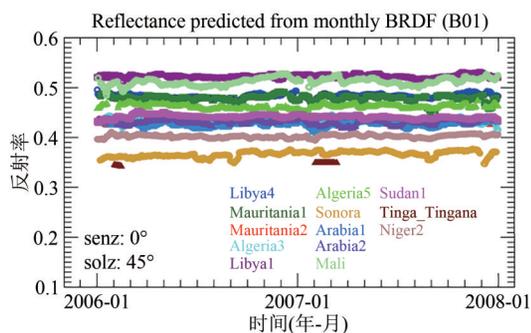
(b) 国内沙漠目标的MCD43A1产品计算值

(b) The reflectance calculated from MCD43A1 for China deserts



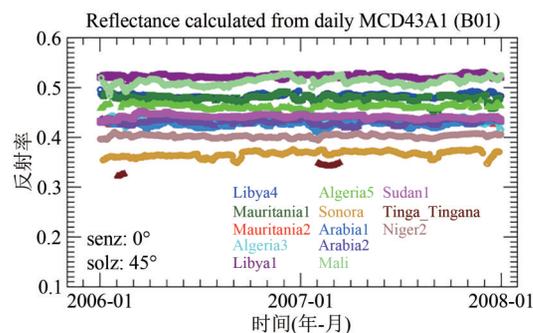
(c) 国内沙漠目标的方向反射率参考模型相对偏差

(c) The model relative bias for deserts over China



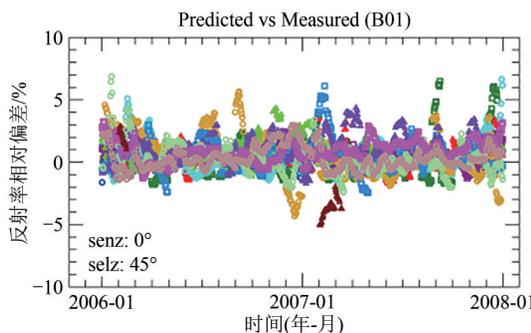
(d) 国外沙漠目标的方向反射率参考模型计算值

(d) The reflectance calculated from model for foreign deserts



(e) 国外沙漠目标的MCD43A1产品计算值

(e) The reflectance calculated from MCD43A1 for foreign deserts



(f) 国外沙漠目标的方向反射率参考模型相对偏差

(f) The model relative bias for foreign deserts

图4 基于方向反射率参考模型计算的沙漠目标地表反射率与基于MCD43A1日产品计算的地表反射率及两者之间的相对偏差  
Fig. 4 Time series of the calculated surface reflectance over desert targets based on their directional reflectance reference model and surface reflectance obtained from the daily products of MCD43A1 and the relative deviation between the two datasets

国内外目标方向反射率参考模型的相对偏差均值和相对偏差的标准差统计结果如图5所示,除了波段1(645 nm),其他6个波段的结果也显示在图中。可以看出,不同波段处的相对偏差均值和相对偏差的标准差比较接近。国外目标中,除了澳大利亚的Tinga\_Tingana,其他12个目标的模型精度较高,相对偏差均值基本在1.5%以内,部分目标能达0.5%以内。相对偏差的标准差除了Sonora和Mauritania1在部分波段处接近2%外,其他目标在MODIS前7个波段处均在1.5%以内。综合相对偏差均值和相对偏差的标准差而言,Libya4的模型精度(衡量标准:相对相差均值 $\pm$ 相对偏差的标准

差)最佳,MODIS的7个反射太阳波段处,相对偏差均值最大在 $\pm 1\%$ 以内;其次是Libya1, Niger2, Mali, Sudan1, Mauritania2和Algeria3(6个目标),相对偏差均值在 $\pm 2\%$ 以内;剩余6个目标中,除了Tinga\_Tingana,其他目标在 $\pm 3\%$ 以内(表2、表3)。

从国内目标的相对偏差均值图(图5(a))可以看出,除了JINT\_1和BDJL\_2的相对偏差均值接近2%外,其他目标的基本在1.5%以内(MODIS前7个波段处)。从国内目标的相对偏差的标准差(图5(b))可以看出,国内目标的模型相对偏差的标准差比国外目标大,不同目标之间也存在较大差异,其中BDJL\_1最小,所有波段基本在1.5%以

内，与国外目标相当；BDJL\_2, TNGR\_1, TNGR\_2, WULBHE和LBPO\_W居中，为1.5%—2%；国内剩余目标中，除KTLM\_1在460 nm处的相对偏差的标准差为4%—5%外，其他目标（DAZH\_W, XCDH\_W, TKLM\_5, KTLM\_3, JINT\_1）约为2.5%—3.5%。综合相对偏差均值和相对偏差的标准差而言，国内目标中，BDJL\_1的模型精度（衡量标准：相对相差均值±相对偏差的标准差）最佳，MODIS的前7个波段处均在±2.5%以内；其次是TNGR\_1, TNGR\_

2, WULBHE, LBPO\_W和BDJL\_2，基本在±3%以内（BDJL\_2在红和近红外波段为±3.3%）；JINT\_1目标的模型最差，约为±6%；其他5个位于柴达木盆地和塔卡拉玛干沙漠的目标（DAZH\_W, XCDH\_W, TKLM\_5, TKLM\_3和TKLM\_5）基本在±5%以内（附表A1）。由于MODIS C6版本的BRDF模型参数产品在敦煌（DHUNG）目标处有效反演结果很少，因此，对于DHUNG目标无法获得可信的BRDF模型参数多年月均统计值。

表2 国内沙漠目标地表辐射基准模型精度(相对误差%±标准差%)

Table 2 Accuracy of domestic desert target's surface radiometric reference model (mean relative bias %±standard deviation %)

序号	国内站点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B6
		645 nm	865 nm	460 nm	555 nm	1240 nm	1240 nm	2130 nm
1	DAZH_W	0.3 ± 3.3	0.5 ± 3.1	<b>0.5 ± 3.3</b>	0.3 ± 3.4	0.2 ± 2.7	-0.1 ± 2.2	0.3 ± 2.4
2	LBPO_W	1.0 ± 1.6	<b>1.1 ± 1.5</b>	1.2 ± 2.0	0.9 ± 1.6	0.6 ± 1.4	0.4 ± 1.7	0.2 ± 1.7
3	XCDH_W	1.3 ± 2.9	1.2 ± 2.7	<b>1.4 ± 3.2</b>	1.5 ± 2.9	1.0 ± 2.4	0.8 ± 1.8	0.8 ± 2.0
4	WULBHE	0.7 ± 1.7	<b>0.7 ± 1.7</b>	0.6 ± 2.0	0.4 ± 1.6	0.3 ± 1.6	0.4 ± 1.7	0.1 ± 2.0
5	TKLM_5	1.4 ± 2.7	<b>1.5 ± 2.6</b>	0.7 ± 3.3	1.2 ± 3.0	0.9 ± 2.4	0.8 ± 2.3	0.7 ± 2.7
6	TKLM_1	0.6 ± 2.2	0.7 ± 2.2	<b>0.4 ± 4.5</b>	0.2 ± 2.6	0.2 ± 2.0	0.3 ± 2.2	-0.1 ± 2.2
7	TKLM_3	0.9 ± 2.7	1.0 ± 2.7	<b>0.7 ± 3.5</b>	0.7 ± 2.8	0.2 ± 2.4	-0.01 ± 3.1	-0.02 ± 2.5
8	TNGR_2	0.6 ± 1.5	<b>0.9 ± 1.5</b>	0.6 ± 1.7	0.4 ± 1.6	0.5 ± 1.4	0.4 ± 1.5	0.1 ± 2.2
9	TNGR_1	0.5 ± 1.5	<b>0.9 ± 1.5</b>	0.4 ± 1.9	0.2 ± 1.7	0.5 ± 1.4	0.4 ± 1.4	0.2 ± 1.7
10	BDJL_2	1.8 ± 1.5	<b>1.9 ± 1.4</b>	1.7 ± 2.0	2.0 ± 1.7	1.2 ± 1.1	1.3 ± 1.2	1.2 ± 1.4
11	BDJL_1	0.9 ± 1.1	<b>1.2 ± 1.0</b>	0.7 ± 1.3	0.8 ± 1.2	0.8 ± 1.0	0.7 ± 0.9	0.4 ± 1.1
12	DHUNG	—	—	—	—	—	—	—
13	JINT_1	<b>-2.4 ± 2.8</b>	-2.3 ± 2.7	-2.0 ± 2.9	-1.9 ± 2.4	-2.4 ± 2.6	-2.4 ± 2.4	-2.3 ± 2.2

注：加粗的为最大误差。

表3 国外沙漠目标地表辐射基准模型精度(相对误差%±标准差%)

Table 3 Accuracy of foreign desert target's surface radiometric reference model (mean relative bias % + standard deviation %)

序号	国内站点	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B6
		645 nm	865 nm	460 nm	555 nm	1240 nm	1240 nm	2130 nm
1	Libya 4	0.2 ± 0.6	0.1 ± 0.6	0.2 ± 0.6	0.2 ± 0.7	-0.1 ± 0.7	-0.1 ± 0.8	<b>-0.2 ± 0.8</b>
2	Mauritania 1	<b>0.1 ± 1.4</b>	0.1 ± 1.3	0.2 ± 1.4	0.5 ± 1.5	-0.1 ± 1.2	-0.1 ± 1.1	-0.4 ± 2.1
3	Mauritania 2	0.5 ± 1.0	0.3 ± 1.0	0.6 ± 1.0	<b>0.6 ± 1.2</b>	0.2 ± 0.8	0.3 ± 0.9	0.1 ± 1.0
4	Algeria 3	0.4 ± 1.2	0.5 ± 1.0	0.5 ± 1.2	<b>0.6 ± 1.4</b>	0.4 ± 1.0	0.3 ± 1.2	0.2 ± 1.5
5	Libya 1	0.4 ± 0.6	0.3 ± 0.7	0.3 ± 0.7	0.4 ± 0.7	<b>0.3 ± 0.9</b>	0.3 ± 0.8	0.2 ± 0.9
6	Algeria 5	0.9 ± 0.9	0.7 ± 0.7	1.0 ± 1.0	<b>1.3 ± 1.2</b>	0.6 ± 0.8	0.3 ± 1.0	0.1 ± 1.0
7	Sonora	0.6 ± 1.7	0.9 ± 1.4	0.5 ± 1.8	0.5 ± 1.9	0.3 ± 1.2	0.3 ± 1.6	<b>0.2 ± 2.2</b>
8	Arabia1	0.5 ± 1.2	0.5 ± 1.3	0.7 ± 1.2	<b>0.9 ± 1.3</b>	0.2 ± 1.4	-0.2 ± 1.0	-0.03 ± 1.6
9	Arabia2	1.1 ± 1.2	1.2 ± 1.2	1.1 ± 1.2	0.9 ± 1.1	1.2 ± 1.2	1.0 ± 1.1	<b>1.3 ± 1.3</b>
10	Mali	0.3 ± 1.1	0.2 ± 1.1	0.3 ± 1.3	<b>0.4 ± 1.4</b>	0.3 ± 0.9	0.3 ± 1.1	-0.01 ± 1.3
11	Sudan1	<b>0.9 ± 0.8</b>	0.7 ± 0.7	0.9 ± 0.8	0.7 ± 0.8	0.3 ± 0.6	0.1 ± 0.4	0.1 ± 0.5
12	Tinga_Tingana	-2.2 ± 2.5	<b>-2.7 ± 4.4</b>	-2.5 ± 2.3	-3.4 ± 2.8	-1.4 ± 2.9	-1.5 ± 1.3	-3.8 ± 1.5
13	Niger2	0.3 ± 0.9	0.1 ± 0.9	0.3 ± 0.8	<b>0.4 ± 0.8</b>	-0.002 ± 0.6	-0.03 ± 0.6	-0.02 ± 0.6

注：加粗的为最大误差。

#### 4.4 基于沙漠稳定目标方向反射率参考模型的辐射定标应用

为了检验上述的沙漠稳定目标方向反射参考模型的辐射定标应用效果，利用该模型对搭载在

FY-3C上的可见光红外扫描辐射计VIRR进行了辐射定标实验，并与基于实时的MODIS BRDF模型参数产品的定标结果进行了比对分析。辐射定标方法采用的是多场地定标方法（Wang等，2018），其

本质是反射率基法，即基于卫星过境时刻，目标的地表、大气特性参数，以及卫星仪器的观测几何和通道的光谱响应函数等参数，使用辐射传输模型，如6SV，模拟计算遥感仪器入瞳处的表观反射率，并与卫星仪器观测的目标上空计数值(DN)进行回归分析，获得遥感仪器的辐射定标系数。详细的方法流程可参考Wang等(2018)的文献。该方法的前提是获取卫星过境时刻的地表、大气特性参数。在之前的多场地定标方法中，假设稳定目标的地表反射率在一天内几乎不变，采用了相同日期的MODIS BRDF模型参数产品，基于式(1)，计

算获得遥感仪器过境时刻的地表方向反射率。因此该方法需要下载与卫星过境日期相同的MODIS BRDF模型参数产品。当MODIS BRDF在卫星过境当天没有有效反演时，或在MODIS未发射的时期(如1999年之前)，基于之前的多场地方法，无法开展卫星仪器的辐射定标工作。而本文构建的稳定目标方向反射率模型，由于给出了稳定目标在每个月份的BRDF模型系数统计值，可以解决以上问题。即，根据卫星仪器的过境月份，选择对应月份的稳定目标的方向反射率参考模型系数，结合式(1)，即可计算卫星观测方向上的地表反射率。

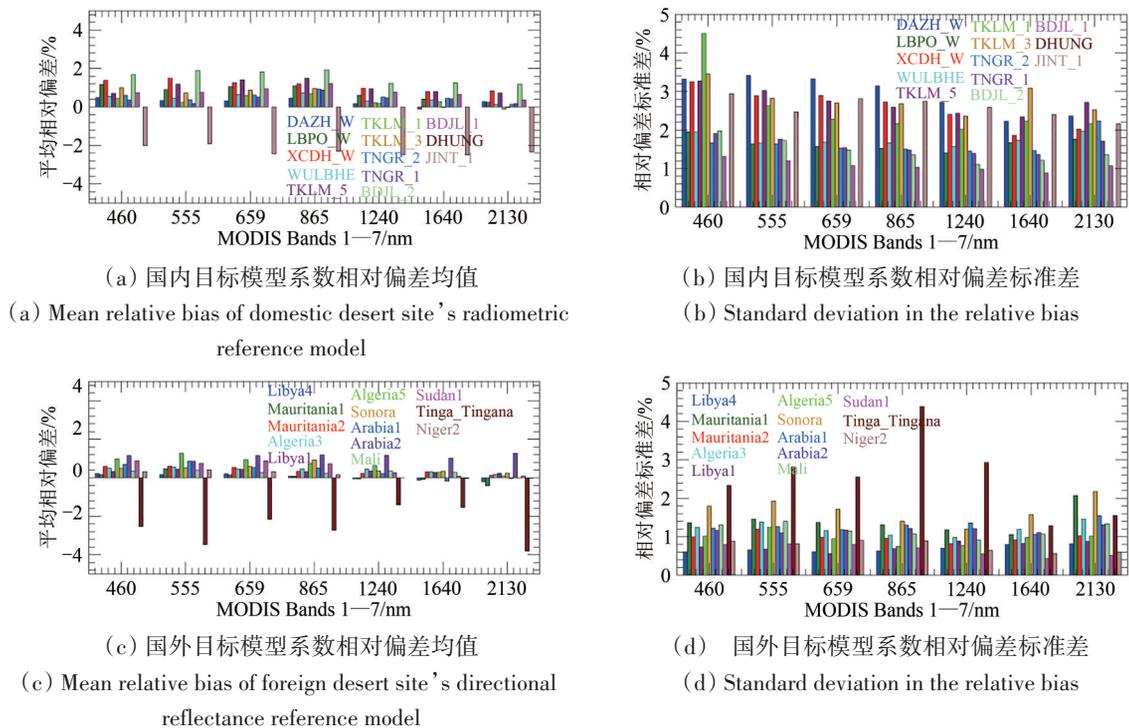


图5 基于2006年—2007年的MCD43A1数据获取的国内外沙漠目标方向反射率参考模型的相对偏差均值和相对偏差的标准差  
Fig. 5 The mean relative bias and standard deviation of the surface directional reflectance reference model over domestic and foreign desert targets obtained based on the 2006—2007 MCD43A1 data

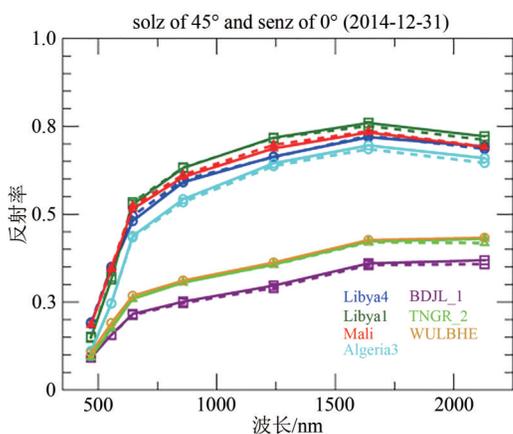
图6(a)给出了基于稳定目标的方向反射率参考模型在12月份的模型系数，以及基于2014—12—31的MODIS BRDF模型参数产品，结合式(1)获得的几个典型稳定目标在MODIS前7个波段处的地表反射率光谱。可以看出，基于方向反射率参考模型获得的地表反射率光谱(图7(a)中的实线)，与基于实时的MODIS BRDF模型参数产品获得的地表反射率光谱(图6(a)中的虚线)比较接近，两者之间的相对偏差比较小，平均相对偏差基本都在 $\pm 2\%$ 以内(图6(a))。由于实时的MODIS BRDF模型参数产品在WULNH位置处没有高质量(QA>2)的BRDF参数反演结果，对于该目标，图6

中未显示出基于MODIS BRDF模型参数产品计算的地表反射率光谱，以及两种地表反射率光谱间的相对偏差结果。

分别利用MODIS BRDF模型参数产品和稳定目标方向反射率模型，作为多场地方法中地表反射率参数的输入，其他输入参数和定标流程保持一致，对FY-3C VIRR进行了辐射定标实验。图7给出了2014—12—31，FY-3C VIRR波段1(0.63  $\mu\text{m}$ )的辐射定标结果。图中的辐射定标样本点，为包含2014—12—31在内的前30天定标样本的累计，采用多天的样本有助于提高每天的辐射定标样本数量，减小辐射定标导致辐射定标结果的不确定性。可

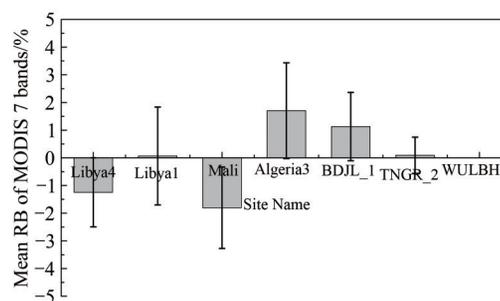
以将多天的定标样本放在一起是基于遥感仪器在短时间内，如10天、一个月，辐射响应变化较小的前提假设。从图7中可以看出，基于方向反射率参考型，获得的FY-3C VIRR波段1处的辐射定标斜率和截距分别为0.1293和-1.4906，与基于MODIS BRDF模型参数产品的辐射定标斜率(0.1300)和截距(-1.5018)比较接近；两个定标曲线的线性拟合度 $R$ 都较高，均为0.998，且拟合误差RMSE都较小，在1%以内。为了定量评估定标系数的差异，图8给出了当DN从0—1000变化时，两种定标系数计算的大气顶反射率的相对偏差。由图8可看

出，对于FY-3C VIRR的反射率太阳波段(波段10的卷云通道除外)，两种定标系数的定标结果(大气顶反射率)集中在1:1线上，相关系数 $R^2$ 为1，定标结果差异较小，相对偏差均值(rbias)在 $\pm 0.6\%$ 以内，相对偏差的标准差(STD)在1.3%以内。这说明使用稳定目标的方向反射率参考模型的辐射定标结果与基于实时的MODIS BRDF模型参数产品的辐射定标结果有很好的-一致性，两者差异也很小，因此该模型可以代替实时的MODIS BRDF模型参数产品开展遥感仪器的辐射定标工作，从而可避免需要频繁下载MODIS地表数据产品的问题。



(a) 稳定目标的反射率光谱

(a) Reflectance spectra of the stable targets

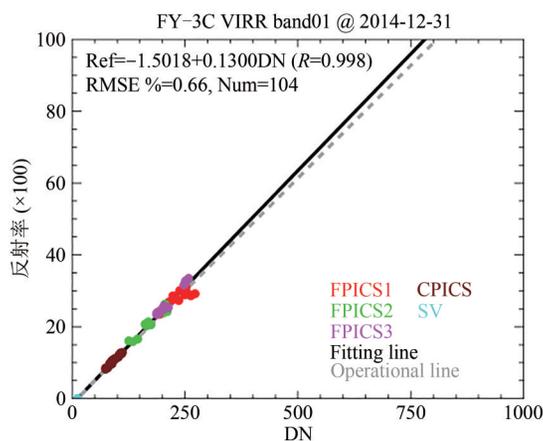


(b) MODIS 7个波段处反射率的平均相对偏差及标准差

(b) Mean relative bias and standard deviation

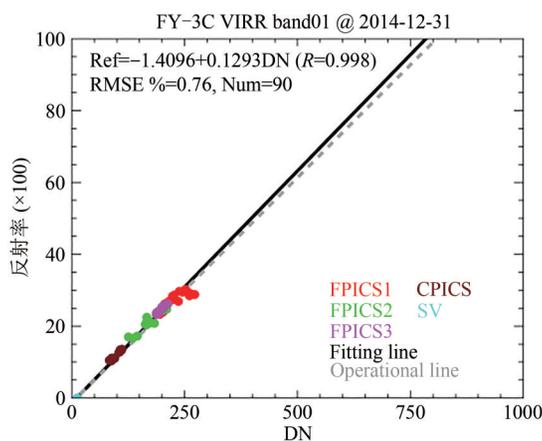
图6 基于目标方向反射参考模型与基于实时(2014-12-31)的MODIS BRDF模型参数产品计算的目标反射光谱及两者之间的相对差异((a)中的实线为基于目标方向反射参考模型计算的反射率光谱,虚线为基于2014-12-31的MODIS BRDF参数产品计算的反射率光谱,(b)中的误差线为标准差)

Fig. 6 Comparison of surface reflectance spectra of the stable targets calculated from the directional reflectance reference model and the MODIS BRDF product in December 31, 2014



(a) 使用MODIS BRDF模型参数产品

(a) Based on directional reflectance reference model



(b) 使用方向反射率参考模型

(b) Based on MODIS daily BRDF product

图7 基于目标方向反射参考模型与基于MODIS BRDF模型参数产品获得的FY-3C VIRR在2014-12-31的辐射定标结果

Fig. 7 Calibration results of FY-3C VIRR Band 1 in December 31, 2014 based on the directional reflectance reference model and the MODIS BRDF product respectively

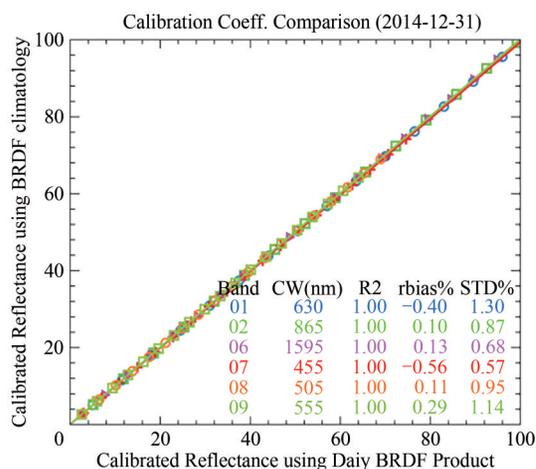


图8 基于目标方向反射参考模型与基于MODIS BRDF模型参数产品获得的辐射定标系数计算的大气顶反射率结果对比

Fig. 8 Comparison of TOA reflectance calculated based on calibration coefficient that obtained from the target directional reflectance reference model and that obtained based on the MODIS BRDF product

## 5 结论

本文利用长时间序列的MODIS BRDF模型参数产品数据,采用统计分析的方法,构建了全球范围内26个沙漠稳定目标的地表方向反射率参考模型,并分析了模型的不确定度、开展了模型的精度验证。最后,以FY-3C VIRR为例,基于多场地定标方法,探讨了该模型在辐射定标应用中的适用性。得到以下结论:

(1) 国内沙漠目标的反射率较国外沙漠目标反射率相对低一些,因此在基于稳定目标的辐射定标应用中,联合使用国内外沙漠稳定目标,有助于增大辐射定标的动态范围,更好地覆盖卫星遥感仪器的动态范围。

(2) 国外目标方向反射率参考模型的不确定度均在3%以下,有10个目标可优于2%。国内目标中,除了TKLM\_3,其他目标的不确定度低于4%,其中位于腾格里和巴丹吉林沙漠的4个目标,以及WULBHE和LBPO\_W低于3%。BRDF模型参数产品

(3) 国外目标中除了澳大利亚的Tinga\_Tingana,其他沙漠目标的方向反射率参考模型的精度都较高,相对偏差均值低于 $\pm 3\%$ ,其中Libya 4的模型精度最佳,相对偏差均值低于 $\pm 1\%$ ,其次是Libya1, Niger2, Mali, Sudan1, Mauritania2和Algeria3这6个目标,相对偏差均值在 $\pm 2\%$ 以内。国内目标方向

反射率参考模型的相对偏差较国外略大,其中BDJL\_1, BDJL\_2, TNGR\_1, TNGR\_2, WULBHE和LBPO\_W 6个目标的模型精度与国外目标相当(BDJL\_1最佳,接近 $\pm 2\%$ );其他目标基本在 $\pm 5\%$ 以内(JINT\_1除外)。

(4) FY-3C VIRR反射太阳通道的辐射定标应用示范结果显示,使用稳定目标方向反射率参考模型与基于实时的MODIS BRDF模型参数产品的定标结果具有很好的一致性,两者差异较小(相对偏差在 $\pm 0.6\%$ 以内),这说明可以使用方向反射率参考模型代替实时的MODIS BRDF模型参数产品,作为多场地定标方法中稳定目标地表反射率的数据来源,既避免了频繁进行数据下载的问题,也避免了当MODIS BRDF模型参数产品缺少有效反演结果(反演质量不佳或没有反演结果)时,无法基于多场地方法对待定标仪器开展辐射定标工作的问题。

志 谢 文中使用的MODIS数据来源于NASA的LAADS Web网站,在此表示感谢!

## 参考文献(References)

- Cosnefroy H, Leroy M and Briottet X. 1996. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 58(1): 101-114 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00211-1]
- Govaerts Y M, Clerici M and Clerbaux N. 2004. Operational calibration of the Meteosat radiometer VIS band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(9): 1900-1914 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.831882]
- Helder D, Thome K J, Mishra N, Chander G, Xiong X X, Angal A and Choi T. 2013. Absolute radiometric calibration of Landsat using a pseudo invariant calibration site. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1360-1369 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2243738]
- Hu X Q, Wang L, Wang J W, He L L, Chen L, Xu N, Tao B C, Zhang L, Zhang P and Lu N M. 2020. Preliminary selection and characterization of pseudo-invariant calibration sites in Northwest China. *Remote Sensing*, 12(16): 2517 [DOI: 10.3390/rs12162517]
- Liang S L, Fang H L, Chen M Z, Shuey C J, Walthall C, Daughtry C, Morisette J, Schaaf C and Strahler A. 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 149-162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00092-5]
- Liu J C, Schaaf C, Strahler A, Jiao Z T, Shuai Y M, Zhang Q L, Roman M, Augustine J A and Dutton E G. 2009. Validation of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) albedo retrieval algorithm: dependence of albedo on solar zenith angle. *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres, 114(D1): D01106 [DOI: 10.1029/2008JD009969]
- Mishra N, Helder D, Angal A, Choi J and Xiong X X. 2014. Absolute calibration of optical satellite sensors using Libya 4 pseudo invariant calibration site. *Remote Sensing*, 6(2): 1327-1346 [DOI: 10.3390/rs6021327]
- Román M O, Gatebe C K, Shuai Y M, Wang Z S, Gao F, Masek J G, He T, Liang S L and Schaaf C B. 2013. Use of in situ and airborne multiangle data to assess MODIS- and Landsat-based estimates of directional reflectance and albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1393-1404 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2243457]
- Roujean J L, Leroy M and Deschamps P Y. 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D18): 20455-20468 [DOI: 10.1029/92JD01411]
- Teillet P M, Barsi J A, Chander G and Thome K J. 2007. Prime candidate Earth targets for the post-launch radiometric calibration of space-based optical imaging instruments//*Proceedings Volume 6677, Earth Observing Systems XII*. San Diego: SPIE: 304-315 [DOI: 10.1117/12.733156]
- Teillet P M and Chander G. 2010. Terrestrial reference standard sites for postlaunch sensor calibration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(5): 437-450 [DOI: 10.5589/m10-079]
- Wang L, Hu X Q and Chen L. 2017. Wide dynamic nonlinear radiometric calibration of optical satellite sensors using multiple stable earth targets. *Journal of Remote Sensing*, 21(6): 892-906 (王玲, 胡秀清, 陈林. 2017. 多目标的卫星仪器宽动态非线性定标. *遥感学报*, 21(6): 892-906 [DOI: 10.11834/jrs.20176351])
- Wang L, Hu X Q, Chen L and He L L. 2018. Consistent calibration of VIRR reflective solar channels onboard FY-3A, FY-3B, and FY-3C using a multisite calibration method. *Remote Sensing*, 10(9): 1336 [DOI: 10.3390/rs10091336]
- Wang L, Hu X Q, Luo Y P, Liu Z Z and Min M. 2019. Selection and characterization of glaciers on the Tibetan Plateau as potential pseudoinvariant calibration sites. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(2): 424-436 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2890672]
- Wanner W, Li X and Strahler A H. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D10): 21077-21089 [DOI: 10.1029/95JD02371]
- Wu A S, Xiong X X, Cao C Y and Angal A. 2008. Monitoring MODIS calibration stability of visible and near-IR bands from observed top-of-atmosphere BRDF-normalized reflectances over Libyan Desert and Antarctic surfaces//*Proceedings Volume 7081, Earth Observing Systems XIII*. San Diego: SPIE: 307-315 [DOI: 10.1117/12.795296]
- Zhu G L, Ju W M, Chen J M, Liu Y B, Zhu J F and Xing B L. 2011. Validation of MODIS BRDF model parameters product and the Ross-Li model with POLDER data. *Journal of Remote Sensing*, 15(5): 875-894 (朱高龙, 居为民, 陈镜明, 柳艺博, 朱敬芳, 邢白灵. 2011. 利用POLDER数据验证MODIS BRDF模型参数产品及Ross-Li模型. *遥感学报*, 15(5): 875-894 [DOI: 10.11834/jrs.20110247])

## Construction of directional reflectance reference model for desert stable earth targets

WANG Ling, HU Xiuqing, XU Na, CHEN Lin, ZHANG Peng, XU Hanlie

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

**Abstract:** Accurate and consistent calibration for long-term satellite remote sensing data is critical to accurately estimate multi-decadal climate variability. However, for the historical optical satellite sensors, the lack of or limited number of synchronous in situ observation of surface Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) model data is the main difficulty to recalibrate their radiance products. This study aims to build a surface directional reflectance reference model for some typical stable earth targets worldwide, providing a uniform surface reflectance reference for the historical remote sensing satellites to perform a consistent recalibration of their long-term TOA radiance products.

The long-term data products from MODIS satellite instrument, well known for its high calibration accuracy and stability, are used to establish the surface directional reflectance reference model for the selected stable earth targets. Specifically, for the desert sites, the MODIS surface BRDF products (MCD43A1) from 2008 to 2012 are used to build a monthly climatology of the BRDF parameters as the surface directional reflectance reference. Then, independent MODIS products, i.e., the data time is different from that used in the model construction, are applied to verify the accuracy of the established directional reflectance reference model. Finally, to check the applicability of this model in the radiometric calibration of satellite instruments, it was used to carry out calibration experiments on the Visible Infrared Radiometer (VIRR) on the FY-3C, and compared with the calibration results obtained based on real-time MODIS BRDF products.

The uncertainty estimation of the surface directional reflectance reference model over desert sites shows that the model uncertainty of foreign desert targets is lower than that of domestic desert targets. The reference model uncertainty of foreign targets is below 3%, and the domestic desert sites are below 4% (except TKLM\_3). The model accuracy verification of the radiometric reference model shows that among the 13 foreign desert targets, except Tinga\_Tingana in Australia, the relative errors are basically within  $\pm 3\%$ , and that in Libya 4 can be less than  $\pm 1\%$ . Six domestic desert sites, i.e., BDJL\_1, BDJL\_2, TNGR\_1, TNGR\_2, WULBHE, and LBPO\_W, can achieve a sound accuracy of within  $\pm 3\%$ , which is comparable to the stable earth targets frequently used by the international research. The radiometric calibration test on FY-3C VIRR shows that using the directional reflectance reference model of the stable target is in good agreement with the radiometric calibration results based on the real-time MODIS BRDF product, and the difference between the two calibration results is very small, i.e., the average relative bias is basically within  $\pm 0.6\%$ .

The results indicate that established directional reflectance reference model over the stable earth targets can be used in the application of radiometric calibration of the optical satellite instruments and can solve the problem of consistent recalibration of historical data from domestic optical satellite instruments.

**Key words:** remote sensing instrument, radiometric calibration, reflectance, BRDF, stable targets, MODIS

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504900, 2018YFB0504901); National Nature Science Foundation of China (No. 41871249, 42001312)