

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

孙凌^{1,2} 胡秀清^{1,2} 郭茂华³ 徐娜^{1,2}

(1 国家卫星气象中心, 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 国家卫星海洋应用中心, 国家海洋局, 北京 100081)

摘要: 搭载于中国第二代极轨气象卫星FY-3A上的中分辨率光谱成像仪(MERSI)是一个类似于MODIS的传感器, 具有19个反射太阳波段和一个热红外波段。尽管MERSI配备了可见光星上定标试验设备, 但是其只能用于仪器响应的衰减跟踪。每年一次的敦煌场地替代定标一直是MERSI反射太阳波段在轨绝对辐射定标的主要方法。为了提高在轨定标频次, 提出了多场地辐射定标跟踪方法。该方法依赖于多个稳定目标场的大气顶模拟辐射, 并基于定标系数时间序列的趋势分析建立了定标日更新模型。以Aqua MODIS观测值为参考, 对MERSI的定标基准进行了评估, 两者的平均相对偏差在5%以内(0.4~2.1 μm)。研究发现: MERSI的短波部分衰减显著, 特别是412nm波段, 年衰减率达9.7%; 红光和近红外波段相对稳定, 年衰减率在±1%以内。采用多种方法分析了MERSI定标结果的可靠性。多场地定标和敦煌场年度替代定标结果间的相对偏差小于3.8%。以Aqua MODIS为参考对定标后的MERSI数据进行了辐射质量监测, 双差分分析表明在辐射稳定的沙漠地区, 两者的平均相对偏差约在5%之内; 同时星下点观测分析也显示出良好的一致性。

关键词: 风云3A (FY-3A), 中分辨率光谱成像仪 (MERSI), 多场地, 反射太阳波段, 替代定标

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.009

Multisite Calibration Tracking for FY-3A MERSI Solar Bands

Sun Ling^{1,2}, Hu Xiuqing^{1,2}, Guo Maohua³, Xu Na^{1,2}

(1 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 National Satellite Ocean Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081)

Abstract: The MEdium Resolution Spectral Imager (MERSI), onboard the second generation Chinese polar-orbit meteorological satellite FY-3A, is a MODIS-like sensor with 19 solar bands and one thermal infrared band. Although there is a visible on-board calibration device, it can only be used for tracking temporal instrument degradation. The vicarious calibration (VC) campaign at the Dunhuang site, conducted once a year, has been the main post-launch absolute radiometric calibration method for MERSI in the solar bands. To increase the in-flight calibration frequency, a multi-site radiometric calibration tracking method is presented. This method relies on simulated radiation over several stable sites, and a daily calibration updating model is built from long-term trending of calibration coefficient series. The MERSI calibration reference is evaluated against the observations of Aqua MODIS, showing mean relative biases within 5% from 0.4 to 2.1 μm. The shortwave channels of MERSI are found to experience large degradation, especially the 412 nm band with an annual degradation rate of 9.7%, while the red and near-infrared bands are relatively stable with annual degradation rates within ±1%. Several approaches have been used to analyze the reliability of MERSI calibration results. A comparison of the calibration slopes shows that the relative biases between the multi-site method and the annual Dunhuang VC campaign are below 3.8%. Aqua MODIS is used as a reference to monitor the data quality of the re-calibrated MERSI. A double difference analysis shows that the mean relative biases are almost within 5% over stable deserts, and the synchronous nadir observation analysis also reveals good agreement.

Keywords: FY-3A, MERSI, multi-site, reflective solar bands, vicarious calibration

收稿日期: 2013年4月3日; 修回日期: 2013年7月20日
第一作者: 孙凌 (1977—), Email: sunling@cma.gov.cn
资助信息: 973计划项目 (2010CB950802); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906036); 863计划项目 (2012AA120903)

1 引言

风云三号 (FY-3) 系列卫星是中国第二代极轨气象卫星。FY-3A作为此系列的第一颗卫星, 于2008年5月27日发射升空, 其轨道为近极地太阳同步轨道, 标称轨道高度为836km, 赤交点时间为上午10:30 (自

北向南, 降轨)。中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 作为搭载在FY-3A上的主要仪器, 具有20个波段, 覆盖了可见光 (VIS) 到长波红外的光谱范围。星下点空间分辨率为0.25km (5个波段) 和1km (15个波段)。FY-3A MERSI能够进行全球观测, 其观测资料可广泛用于地球科学研究。

定量遥感对遥感器的辐射性能敏感, 因此, 遥感器定标是进行卫星定量遥感应用的前提之一。反射太阳波段 (RSBs) 的在轨响应变化显著, 特别是波长小于500nm的短波波段^[1], 必须予以有效的监测和订正。定期和可靠的星上绝对定标可以保证遥感器的辐射测量质量 (良好的精度和稳定度)。尽管MERSI设计有可见光星上定标试验设备, 但是由于其不定期工作且不能溯源到发射前或是国际标准 (SI), 因此, 只能用于研究性的遥感器响应衰减跟踪。MERSI反射太阳波段7%的定标精度指标^[2]必须采用其他定标方法达到。反射太阳波段的在轨定标与监测方法有很多, 包括基于均匀定标场采用辐射传输模型和同步现场测量参数^[3, 4]或者其他来源参数^[5-7]的替代定标、利用高亮的均匀稳定目标 (如沙漠^[5, 6, 8, 9]、冰川^[10, 11]和深对流云^[12, 13]) 进行辐射跟踪、利用月亮目标的辐射跟踪^[14, 15]以及基于参考遥感器或者波段的交叉定标^[16, 17]。用于反射太阳波段卫星遥感器定标的中国遥感卫星辐射校正场 (CRCS) 位于中国西北部的敦煌戈壁。基于同步现场测量的敦煌场地替代定标自2002年起已经成为了中国风云系列卫星的业务定标手段, 每年夏天都会例行开展一次野外试验^[18]。尽管近期有研究表明, 以Aqua MODIS观测值为参考, CRCS替代定标在可见光和近红外 (NIR) 窗区波段的平均精度约为3%^[19], 但是一年一次的有限定标次数远不能满足在轨定标系数更新的需求。为了提高定标频次并监测MERSI辐射响应变化, 国家卫星气象中心 (NSMC) 开发了一种基于多场地的定标跟踪方法, 该方法依赖于稳定目标和辐射传输模拟, 但无需同步现场观测。

本文对多场地定标方法进行了介绍, 包括定标基准的评估, MERSI在轨响应的长期变化, 以及定标性能分析。文章第2节对MERSI进行了简介。第3节描述了FY-3A MERSI反射太阳波段多场地定标跟踪、定标基准不确定性评估 (以Aqua MODIS为参考) 和定标结果比对的方法。第4节展示了FY-3A MERSI定标跟踪结果, 以及定标性能评估结果, 包括与独立的CRCS替代定标系数的对比, 以及与Aqua MODIS在稳定的沙漠目标和同时星下点观测 (SNO) 目标的对比。最后为本文的小结。

2 FY-3A MERSI概述

2.1 仪器简介

FY-3A MERSI是一个采用45°扫描镜和消旋K镜的跨轨多探元并扫式辐射计。MERSI的扫描周期为1.5s, 可对星下点±55°的视场进行对地观测, 提供一个2900km (跨轨) × 10km (沿轨, 星下点) 的扫描带 (10或40个探元), 可实现每天一次的全球覆盖。该遥感器具有19个反射太阳波段 (0.41~2.13μm) 和1个红外发射波段 (11.25μm), 其星下点空间分辨率为250m (5个波段) 和1km (15个波段), 具体指标参见表1。图1显示了FY-3A MERSI反射太阳波段的光谱响应函数 (SRFs)。MERSI共有350个沿轨排列的探测器: 250m波段, 每个波段40个探元; 1km波段, 每个波段10个探元。MERSI 20个波段的全球中分辨率窄带观测资料可为陆地、海洋和大气的科学研究和应用提供有用信息。

MERSI反射太阳波段的定标预期精度为7%^[2]。MERSI设计有可见近红外波段的星上定标器 (VOC), 它是风云系列卫星遥感器的第一个可见光星上定标实验装置。可见光星上定标器包含有一个嵌有内部定标灯的直径6cm的积分球、太阳光入射口、准直出射系统 (包括一个平面镜和抛物镜) 和5个辐亮度陷阱探测器 (4个采用MERSI波段1~4的滤光片设计, 中心波长分别为470, 550, 650和865nm; 一个全色波段)。每个扫描周期, MERSI可实现对深冷空间 (SV)、地球目标 (EV)、星上定标器的观测。

表1 MERSI光谱波段指标

波段	中心波长 (μm)	波段宽度 (μm)	星下点分辨率 (m)	NEΔρ (%) 或 NEΔT (K@300K)	动态范围 (最大ρ或T)
1	0.470	0.05	250	0.45	100%
2	0.550	0.05	250	0.4	100%
3	0.650	0.05	250	0.4	100%
4	0.865	0.05	250	0.45	100%
5	11.25	2.5	250	0.4K	330K
6	1.640	0.05	1000	0.08	90%
7	2.130	0.05	1000	0.07	90%
8	0.412	0.02	1000	0.1	80%
9	0.443	0.02	1000	0.1	80%
10	0.490	0.02	1000	0.05	80%
11	0.520	0.02	1000	0.05	80%
12	0.565	0.02	1000	0.05	80%
13	0.650	0.02	1000	0.05	80%
14	0.685	0.02	1000	0.05	80%
15	0.765	0.02	1000	0.05	80%
16	0.865	0.02	1000	0.05	80%
17	0.905	0.02	1000	0.10	90%
18	0.940	0.02	1000	0.10	90%
19	0.980	0.02	1000	0.10	90%
20	1.030	0.02	1000	0.10	90%

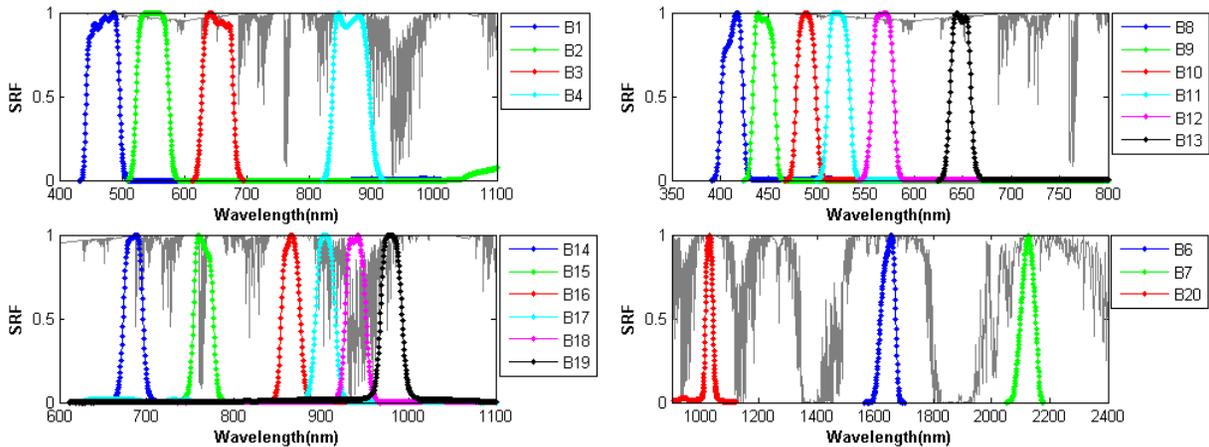


图1 FY-3A MERSI反射太阳波段的光谱响应函数（气体吸收透射率用灰色线表示）

由于该设备不定期工作且不能溯源到发射前或是SI，因此，只能用于研究性的遥感器响应衰减跟踪^[20]。

可见光和近红外的焦平面组件（FPAs）采用p-i-n光电二极管。短波红外（SWIR）波段采用光电HgCdTe探测器。短波红外波段（波段6和7）焦平面的工作温度为90K（采用辐射制冷器控温）。不幸的是，波段6和7受到异常的电子增益跳变的影响，其原因可能是静电放电^[19]。

2.2 在轨定标更新

敦煌作为CRCS反射太阳波段卫星遥感器定标场地，于2008年被地球观测卫星委员会（CEOS）的定标与真实性检验工作组（WGCV）选定为具有仪器观测的参考站点之一。该场地位于平坦的冲积扇，表面覆盖有沙土和砂砾，几乎无植被。该场地的地表光谱反射率稳定，10km×10km中心区域的方差系数（CV，标准差和平均值的比值）约为3%。气溶胶浓度低，除了春天沙尘季节外，550nm气溶胶光学厚度约为0.2；可见近红外的地表反射率约为15%~30%。2008年夏季，基于现场观测建立了地表双向反射分布函数（BRDF）模型。

自2002年起，基于同步现场测量的CRCS替代定标成为了中国风云系列卫星的定标基线方法。每年夏

天开展一次野外试验，测量内容包括地表反射率、气溶胶光学厚度和大气廓线。之前的风云系列卫星遥感器在轨定标更新策略是：对定标系数变化超过5%（2次CRCS替代定标）的波段进行更新。

尽管近期有研究表明CRCS替代定标在可见光和近红外窗区波段的平均精度约为3%（以Aqua MODIS观测值为参考）^[19]，但是一年一次的有限定标次数远不能满足有效监测遥感器辐射响应衰变和在轨定标系数更新的需求。为此，多种定标跟踪方法被用于监测反射太阳波段的辐射响应变化，如针对深对流云、极地冰川Dome C和沙漠等稳定目标的长期趋势分析。为了完成MERSI反射波段的在轨业务定标，多场地辐射传输模拟的方法也得以实现（将在下面介绍）。

3 方法

国际上已经在撒哈拉沙漠和沙特阿拉伯沙漠选取了一系列辐射稳定且高亮的目标场地^[21]，这些场地被广泛的用于反射太阳波段的绝对或相对定标。欧洲气象卫星组织（EUMETSAT）已成功的采用多个高亮的沙漠场地实现了反射太阳波段的绝对定标^[6]。针对FY-3A MERSI，我们也选取了多个表面特性均匀稳定的场地进行辐射定标跟踪，其中包括3个高亮沙漠目标，分别为利比亚1（24.42°N，13.35°E），



图2 定标目标场地的FY-3A MERSI真彩色图像（RGB采用波段3，2和1）。5个站点分别是：
(a) 敦煌（40.14°N，94.32°E）；(b) 利比亚1（24.42°N，13.35°E）；(c) 利比亚4（28.55°N，23.39°E）；
(d) 阿拉伯2（20.13°N，50.96°E）；(e) 拉奈（20.49°N，-157.11°E）

利比亚4 (28.55° N, 23.39° E) 和阿拉伯2 (20.13° N, 50.96° E); 一个CEOS/WGCV推荐的中等亮度戈壁目标, 敦煌 (40.14° N, 94.32° E); 一个具有海洋光学浮标 (MOBY)^[22]观测的拉奈岛 (20.49° N, -157.11° E) 附近的低亮度海洋目标。图2给出了MERSI定标目标场地的图像, 具体位置在图3中标出。

3.1 在轨定标模型

卫星数据选择: 对MERSI 1km产品 (包括250m波段的降分辨率数据集) 进行Lambert投影。选取场地中心3×3窗口像元, 满足以下条件的像元均值将用于定标计算: 检测空间均匀性, 剔除波段1~4中存在CV大值的数据; 剔除太阳天顶角大于70°的数据; 拉奈岛场地采用40°的耀斑角阈值以避免太阳耀斑的污染。剔除MERSI观测大气顶反射率与辐射传输模拟值之间相对偏差大于30%的数据, 以避免残留的云污染。由于遥感器近红外波段的响应衰减很小 (见第4节), 采用波段4 (865nm) 和2008年敦煌替代定标系数^[19]进行云剔除中观测反射率的计算。

辐射传输模拟: 基于观测时刻的太阳和卫星角度、光谱响应函数和对应的表面和大气特性参数, 使用矢量辐射传输模型6SV1^[23]计算晴空目标区的光谱辐射。

采用MODIS BRDF模型^[24]计算陆地站点的表面双向反射率。该BRDF模型依赖与波长有关的3个核参数。这些参数值取自MCD43C1产品, 并光谱插值到MERSI波段中心波长。海洋场地采用MOBY观测的离水反射率。大气廓线采用1962美国标准大气。陆地和海洋场地分别采用6SV1模型中提供的沙漠和海洋气溶胶模型。550nm气溶胶光学厚度采用MODIS月产品 (陆上采用Aqua的深蓝算法结果, 海上采用Terra的结果)^[25]。臭氧总量采用TOMS的多年月平均气候数据集^[26], 水汽总量和表面风速采用NCEP再分析资料的月平均气候数据^[27]。

定标计算: 采用6SV1模型计算TOA反射率, 累积每个目标场地的卫星观测计数值和模拟反射率的时间序列。通常, 定标系数随时间缓慢变化。考虑到不同亮度等级的多场地数据相比于单站点可以更好地覆盖遥感器的动态范围, 同时较多的数据可以降低反射率计算的不确定性^[28], 在每个周期 (如10d) 采用5个场地的数据, 根据如下公式计算定标系数:

$$100Ref_i \cos(SolZ)/d^2 = Slope_i(EV_i - SV_i) \quad (1)$$

其中, Ref_i 是辐射传输模型计算的第*i*个波段的瞬时大气顶反射率, 定义为 $\pi d^2 Rad/(E_0 \cos(SolZ))$, Rad 是遥感器对地观测辐亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), E_0 是日地平均距离处的大气层外太阳辐照度, $SolZ$ 是太阳天顶

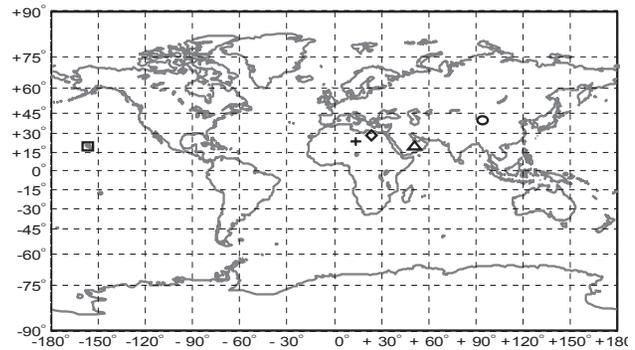


图3 定标目标场地的位置。戈壁和高亮沙漠站点为敦煌 (圆形), 利比亚1 (加号), 利比亚4 (菱形) 和阿拉伯2 (三角形); 海洋站点为拉奈 (正方形)

角, d 是日地距离 (AU), $Slope$ 是定标斜率, EV 和 SV 分别是对地和冷空观测 (作为辐射零点) 的计数值。在下文中使用反射率因子 (RefFactor) 来表示 $Ref_i \cos(SolZ)/d^2$ 。图4给出了一个定标周期 (10d) 内 19 个MERSI反射太阳波段的定标散点图, 其中, 波段 17~19 为水汽波段, 结果仅供参考。由于海洋场地的数据有限, 在计算定标斜率时所占的比重较小。

趋势建模: 基于定标系数序列, 采用线性模型来描述定标斜率的长期变化趋势:

$$Slope_i = a_i DSL + b_i \quad (2)$$

其中, DSL 为自发射日起的日计数, a_i 反映了第*i*个波段的响应 ($1/Slope$) 日衰减, b 为模式估计的发射日定标斜率。

为了与其他研究保持一致, 第*i*个波段的归一化响应定义为 $NResponse_i = b_i/Slope_i$ 。同样, 采用线性模型描述遥感器响应的衰变:

$$NResponse_i = c_i DSL + d_i \quad (3)$$

其中, c 和 d 是响应衰变模型系数。因此, 遥感器响应的年衰变率可以通过以下公式确定:

$$AnnualRate_i = -365 \cdot c_i / d_i \quad (4)$$

3.2 定标基准的不确定性评估

如3.1节所述, MERSI的定标基准是辐射传输模型计算的大气顶反射率。在辐射计算中使用的参数几乎全部来自于卫星和气候数据集, 而不是场地现场观测值, 参数的不准确性和辐射传输模式本身, 都会影响大气顶辐射的计算精度。本节的目的是利用一个定标良好的传感器 (如EOS MODIS) 的观测值来评估MERSI定标基准的准确性 (偏差) 和精确性 (方差)。鉴于Aqua MODIS的在轨辐射性能优于Terra MODIS^[1], 上文列举的4个陆地站点的Aqua MODIS晴空观测值被用作大气顶辐射“真”值, 来评估辐射模拟的性能。采用与MERSI相同的计算方案, 针对

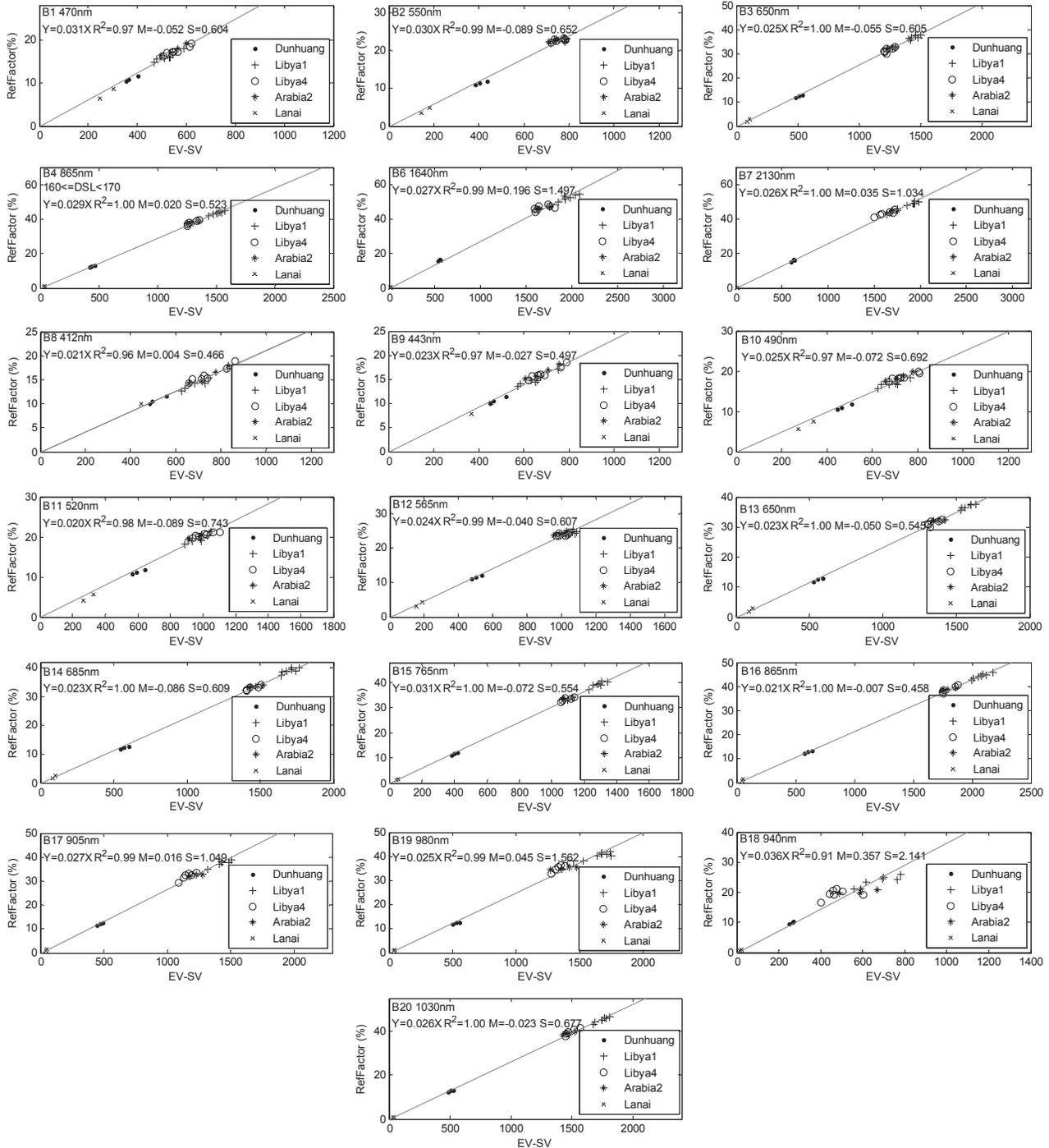


图4 19个反射太阳波段的大气反射率模拟值与MERSI观测计数值（进行了冷空剔除）的散点图。M和S是反射率模拟值和线性拟合线间偏差的均值与标准差。DSL是自发射日起的日计数。图中，DSL在160~170之间，使用了23个数据

MODIS的观测几何和波段响应函数模拟大气顶反射率，并与MODIS的观测值进行对比。

数据采用2008—2009年的第5版本MYD1KM和MYD03产品（从NASA网站获取）。由于在戈壁和沙漠地区，MODIS的波段11~16经常饱和，另波段17，18，19和26受水汽吸收的影响；因此，评估只针对前10个波段进行。场地中心3×3像元窗口的均值被用于

比对分析，数据过滤采用以下原则：检测空间均匀性，剔除波段1~5中存在CV大值的数据；当观测的波段1大气顶反射率大于0.6时，数据被认为是非晴空予以剔除。对每组遥感器观测值和模式模拟值，相对偏差百分比定义如下：

$$PDif = 100 \cdot (Ref^{est} - Ref^{mea}) / Ref^{mea} \quad (5)$$

其中， Ref^{est} 是辐射传输模拟的大气顶表现反射

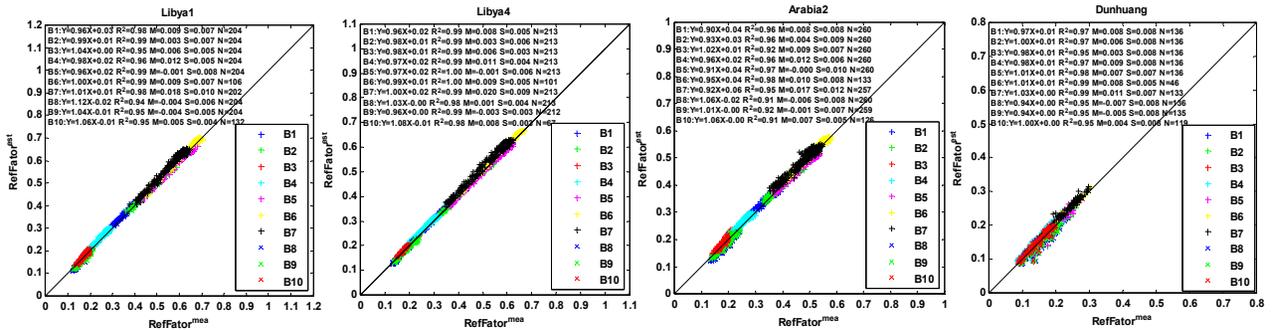


图5 MODIS观测与模拟反射率的散点图(利比亚1、利比亚4、阿拉伯2及敦煌站点), 数据为2008—2009年。图中给出了1:1实线和线性拟合参数(M和S是模拟反射率和MODIS测量值间偏差的均值和标准差)

率, Ref^{mea} 是传感器观测值。由于辐射传输模拟在大天顶角时误差相对较大, 比对分析只采用天顶角小于 70° 的数据。

3.3 定标结果对比

使用3.1节公式(2)的定标更新模型进行FY-3A MERSI定标系数的日更新。对FY-3A MERSI反射太阳波段定标结果采用以下3种方法进行分析。

由于CRCS替代定标每年在敦煌开展一次同步观测试验, 其在可见近红外窗区波段的平均定标精度约3% (以Aqua MODIS为参考) [19], 因此, 采用CRCS的年度替代定标结果与定标更新模型给出的定标斜率进行对比。

针对稳定的陆面目标与SNO目标, 以Aqua MODIS为参考值, 对定标后的MERSI辐射质量进行监测分析。在均匀的陆面目标, FY-3A MERSI和Aqua MODIS之间的定标偏差可以用以下两个表达式(6, 7)来描述[29, 30]:

$$\Delta Ratio = \left\langle \frac{Ref_{MERSI}^{Mea} / Ref_{MERSI}^{Est}}{Ref_{MODIS}^{Mea} / Ref_{MODIS}^{Est}} \right\rangle \quad (6)$$

$$\Delta Dif / Ref_{MODIS}^{Mea} = \frac{\left\langle \frac{Ref_{MERSI}^{Mea} - Ref_{MERSI}^{Est}}{Ref_{MODIS}^{Mea}} \right\rangle - \left\langle \frac{Ref_{MODIS}^{Mea} - Ref_{MODIS}^{Est}}{Ref_{MODIS}^{Mea}} \right\rangle}{Ref_{MODIS}^{Mea}} \quad (7)$$

其中, 上标“Mea”表示仪器观测值, 上标“Est”表示由3.1节描述的方法计算的辐射传输模拟值, $\Delta Ratio$ 是经过辐射传输模拟值归一化后的MERSI与MODIS大气顶反射率观测值的比值。 ΔDif 是经过辐射传输模拟值归一化后的传感器观测值间的偏差, $\Delta Dif / Ref_{MODIS}^{Mea}$ 是仪器观测值间的相对偏差。这两个定标偏差量由光谱接近的FY-3A MERSI和Aqua MODIS波段的同天晴空观测数据计算得到。采用4个陆地站点(敦煌、利比亚1、利比亚4和阿拉伯2)2008—2009年的数据。云滤除采用简单的阈值方法, 包括前文所述的空间均匀性阈值和TOA反射率阈值(采用红光波段, 敦煌取0.4, 其他站点取0.6)。太阳天顶角大于 60° 的数据被剔除。考虑到MODIS在一些波段的饱和现象和MERSI

在6和7波段的异常电子增益跳变, 选取MERSI的波段1~4和8~10与MODIS对应波段进行比对。

除了在均匀稳定的陆地目标对经辐射传输模拟值归一化后的传感器观测值进行比对之外, 还采用SNO方法将定标后的MERSI大气顶反射率与Aqua MODIS观测值进行直接交叉对比。采用以下准则进行MERSI和MODIS的数据匹配: 角度要求 $SenZ < 35^\circ$; $|\cos(SenZ_{MODIS}) / \cos(SenZ_{MERSI}) - 1| < 0.01$ 和 $|\cos(SolZ_{MODIS}) / \cos(SolZ_{MERSI}) - 1| < 0.01$; 空间均匀性要求 $(4 \times 4 \text{窗口}) CV < 2\%$, $Std < 0.1\%$ 。

4 结果与讨论

4.1 定标基准的不确定性

图5为2008—2009年各陆地站点MODIS观测与模拟反射率的比对散点图。图中还给出了线性拟合参数(M和S是模拟反射率和MODIS观测值间偏差的均值和标准差)。为了增加绘图点的数据范围, 使用3.1节定义的 $RefFactor (Ref_i \cos(SolZ) / d^2)$ 代替大气顶表观反射率。由于探测器的失效与饱和现象, 波段6, 7, 9和10设有单独的CV阈值, 导致各波段数据量不等。由图中可以看出, 模拟值与观测值之间具有很好的相关性, 所有波段的 R^2 都超过0.91。蓝光波段, 如波段3, 8, 9和10, 其线性关系略差于其他波段, 尤其是在阿拉伯2站点。其可能的原因是该光谱范围的表面反射率通常存在剧烈的变化[28], 波段8~10的BRDF模型参数由内插得到, 且表面反射率在该光谱范围内相对较低。

图6给出了各陆地站点的MODIS观测与模拟大气顶表观反射率的平均相对偏差百分比。可以看出, 利比亚4的效果最好, 而敦煌站则相对较差。敦煌站的相对偏差的标准差明显高于其他站点, 这一现象可能是由于此处的表面反射率相对较低引起的。图7和图8给出了所有陆地站点的散点图和平均相对偏差百分比。可以看出, 除波段8和9外, 模拟值普遍偏高。对于

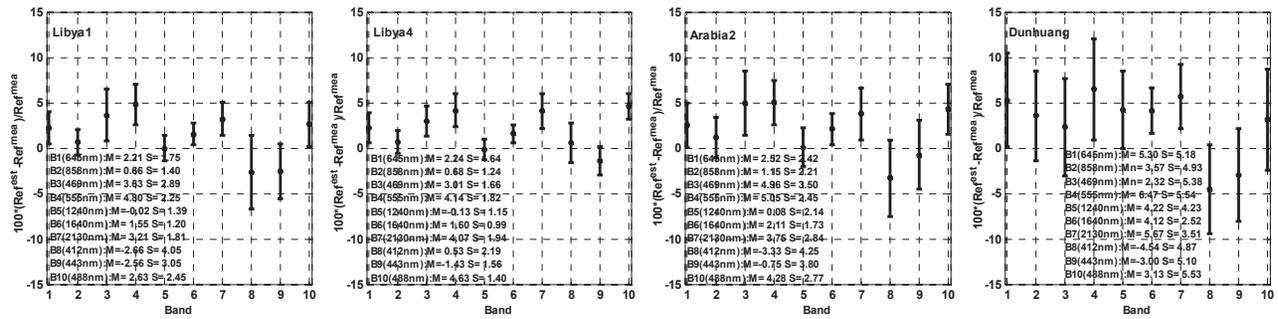


图6 MODIS观测与模拟的大气顶表观反射率的平均相对偏差百分比(利比亚1、利比亚4、阿拉伯2及敦煌站点)。误差线表示一个标准差,图中给出了均值(M)和标准差(S)信息

中心波长在0.4~2.1 μm 的10个波段,相对偏差的均值在5%以内,标准差在2%~4%(在蓝光区域相对较大)。

通过研究偏差的时间特征,发现其存在着季节性变化趋势,并且蓝光波段与其他波段明显不同。该季节性趋势在波段1(645nm),4(555nm)及8(412nm)更为明显,且不同站点表现的时间特征相似。图9给出了MODIS观测与模拟大气顶表观反射率间月平均相对偏差百分比的时间变化。表2给出了2008—2009年各陆地站点的月平均PDif值。由于

波段10(488nm)在3—9月的数据量有限,其结果仅作参考。由表中可见,月均值的变化幅度大致在1.5%~4.9%之间,其中,波段6(1640nm)最小,波段8(412nm)最大。导致该时间特征的原因包括仪器的温度响应和大气及地表参数的不确定性。以往研究^[28]表明,地表特性的不确定性是模拟的最大误差源。然而,针对MODIS BRDF产品的时间变化分析并没有发现地表特性的季节性变化。考虑到Aqua MODIS的探测器温度响应已在发射前得以确定,因

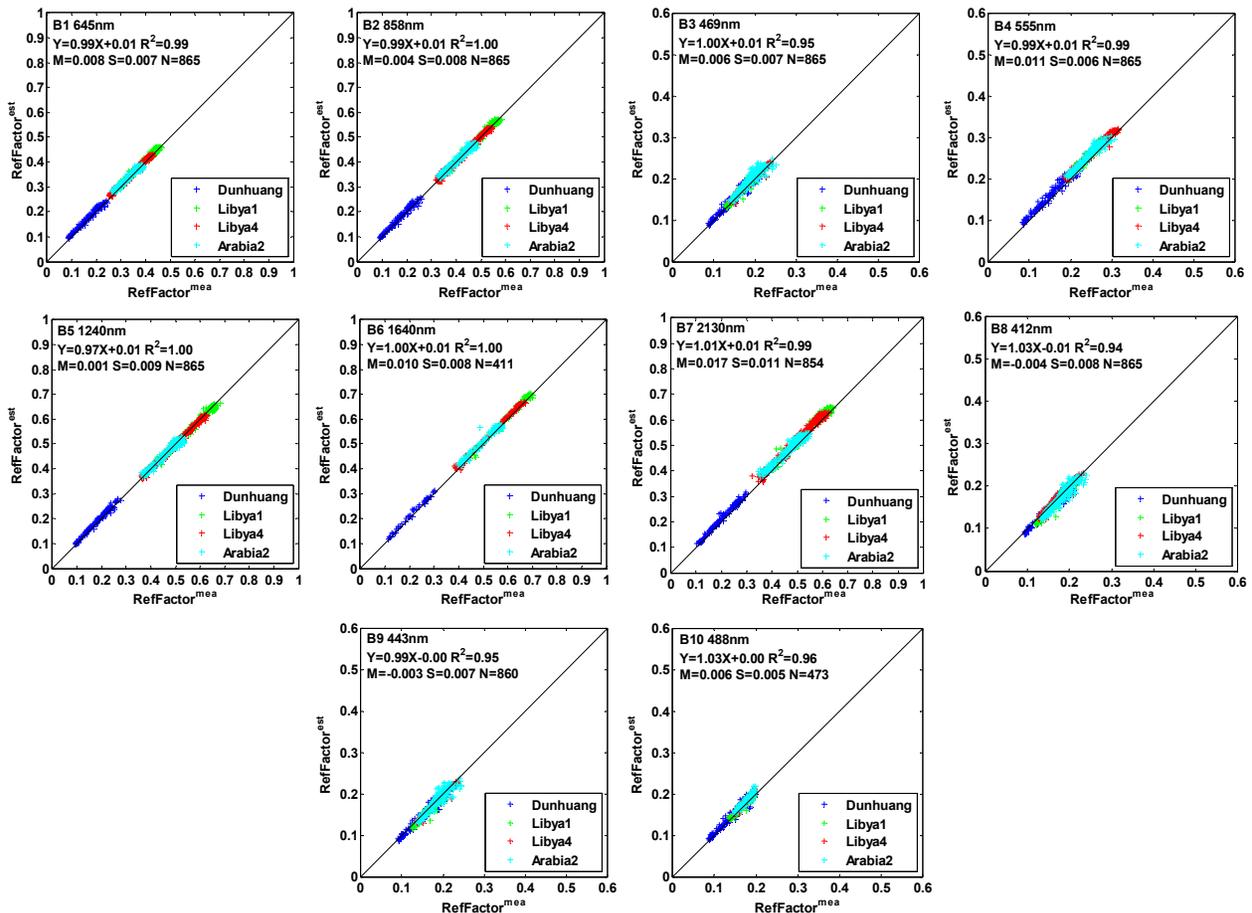


图7 MODIS波段1~10的观测与模拟反射率的散点图(4个陆地站点),数据为2008—2009年。图中给出了1:1实线和线性拟合信息(M和S是模拟反射率与MODIS测量值间偏差的均值和标准差)

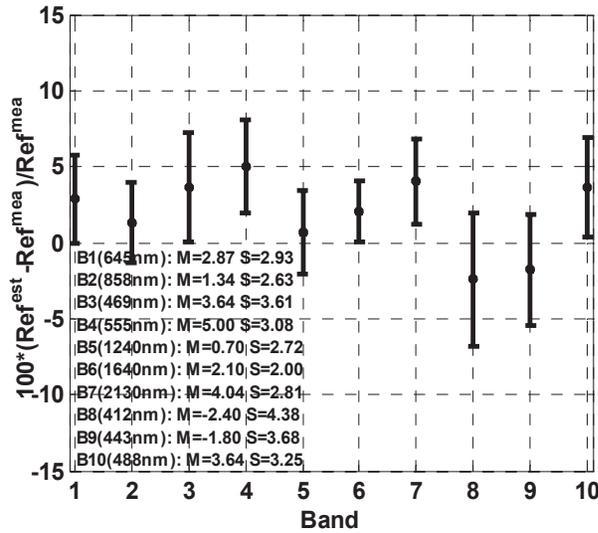


图8 4个陆地站点的MODIS观测与模拟大气顶表现反射率的平均相对偏差百分比。误差线表示一个标准差，图中也给出了均值和标准差信息

此，该季节性变化的最可能原因是大气参数（包括气体和气溶胶）的不准确性。在蓝光波段，由于气体吸收很弱，气溶胶占主导地位，并且波长越短影响越大；而在其他波段，气体可能是主要原因。

4.2 MERSI 定标跟踪结果

图10给出了14个FY-3A MERSI反射太阳波段的定标斜率时间序列（不包括17~19三个水汽波段和6, 7两个受到增益异常跳变影响的短波红外波段），图中黑色实线为线性回归模型。可以看出，定标系数随着发射后日计数DSL存在线性变化趋势，但仍有季节性影响。对绿光到近红外的大多数波段，定标系数在11—2月相对于5—8月有偏高的趋势，特别是在红光和近红外波段，如波段3（650nm），4（865nm），13（650nm），14（685nm），15（765nm）和16（865nm）。然而，在蓝光波段有不同的变化趋势，如波段1（470nm），8（412nm）和9（443nm）。

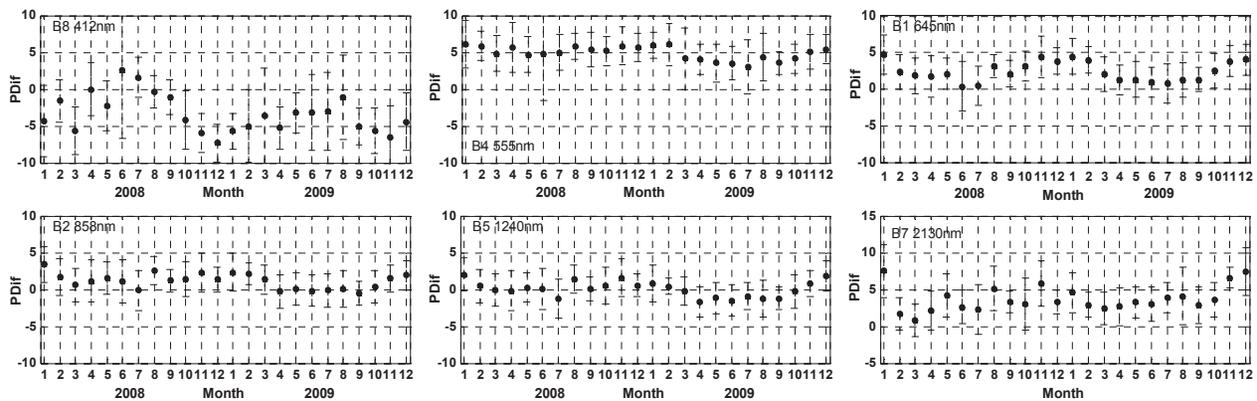


图9 陆地站点MODIS波段8, 4, 1, 2, 5和7的观测与模拟大气顶表现反射率间的月平均相对偏差百分比的时间变化（2008至2009年）。误差线表示一个标准差。

表2 2008—2009年陆地站点的MERSI观测与模拟大气顶表现反射率间相对偏差百分比的月均值 (M) 和标准差 (S)

波段	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		M	4.95	3.3	2.95	2.13	1.65	1.04	1.56	2.25	2.71	3.63	4.15
S	3.56	3.17	3.33	3.04	2.33	2.28	2.12	2.02	2.16	2.46	2.76	3.13	
M	2.83	1.6	1.91	1.06	0.8	0.3	0.59	1.36	1.22	1.59	1.48	1.87	
S	3.23	3.09	2.94	2.93	2.4	2.23	2	2.18	2.26	2.55	2.6	2.66	
M	4.39	4.67	4.58	5.31	3.67	3.36	2.82	3.67	3.39	3.07	2.33	3.21	
S	3.12	3.65	4.99	3.9	3.05	4.85	3.39	3.20	2.9	2.91	3.01	2.54	
M	6.69	5.75	5.44	5.22	3.96	3.54	3.63	4.25	4.68	5.44	5.74	6.55	
S	3.52	3.32	4.02	3.44	2.47	3.16	2.46	2.17	2.26	2.34	2.79	3.08	
M	1.65	0.56	0.75	-0.1	-0	-0.3	-0.1	0.76	0.67	1.5	1.56	1.7	
S	3.09	2.64	2.74	2.73	2.59	2.3	2.01	2.62	2.55	3.13	2.67	2.65	
M	2.68	2.21	2.6	1.54	1.74	1.39	1.69	1.63	2.02	2.04	2.7	2.87	
S	2.65	1.51	2.35	1.53	1.71	2.93	1.32	0.93	1.44	1.81	2.13	1.9	
M	5.12	2.47	2.84	2.47	3.1	3.04	3.98	4.72	4.95	4.99	4.91	5.39	
S	3.66	1.97	3.04	2.16	2.41	1.91	1.91	2.33	2.73	3.15	2.46	3.21	
M	-3.6	-2.8	-2.5	-0.5	-1.4	-0.5	-1.2	-1.03	-2.2	-3.6	-5.3	-4.7	
S	3.44	4.05	5.36	3.78	3.53	4.99	3.47	3.75	3.77	4.4	4.5	3.58	
M	-1.8	-1.5	-1.3	0.06	-1.2	-0.9	-1.9	-1.23	-1.8	-2.6	-3.9	-3.1	
S	3.17	3.74	4.98	3.55	2.81	4.92	3.4	3.25	2.9	3.14	3.32	2.66	
M	4.54	4.12	5.24	7.18	3.46	4.62	3.15	3.15	2.9	3.06	2.68	3.43	
S	2.95	4.01	4.41	4.17	2.43	1.8	3.04	1.66	3.29	2.82	3.1	2.43	

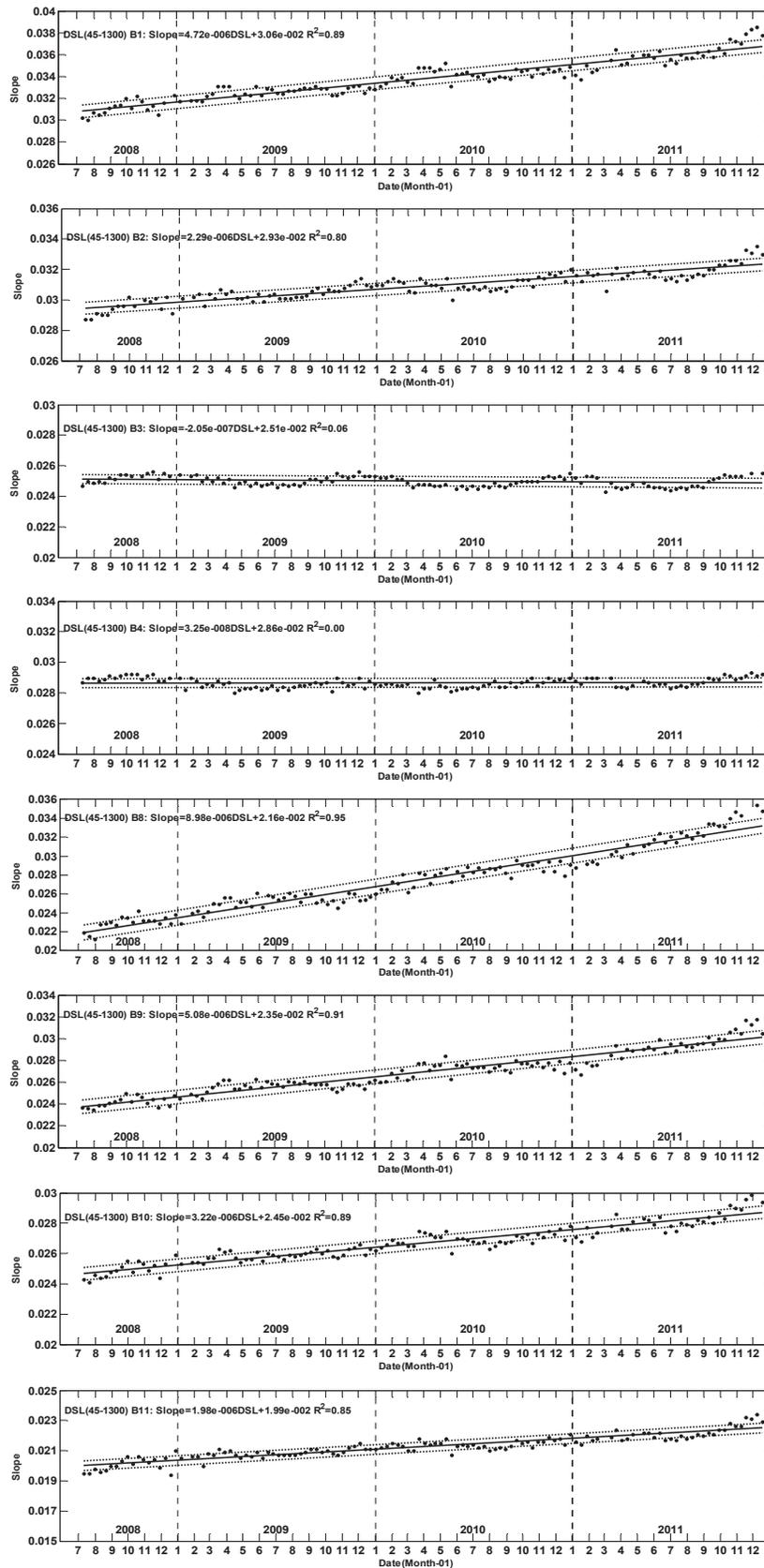


图10 多场地方获得的14个FY-3A MERSI反射太阳波段的定标斜率时间序列（点图，不包括17~19三个水汽波段和6, 7两个短波红外波段）。时间自2008年七月—2011年十二月。定标斜率的时间变化呈线性趋势（实线）。虚线表示定标斜率与拟合模型间偏差的标准差

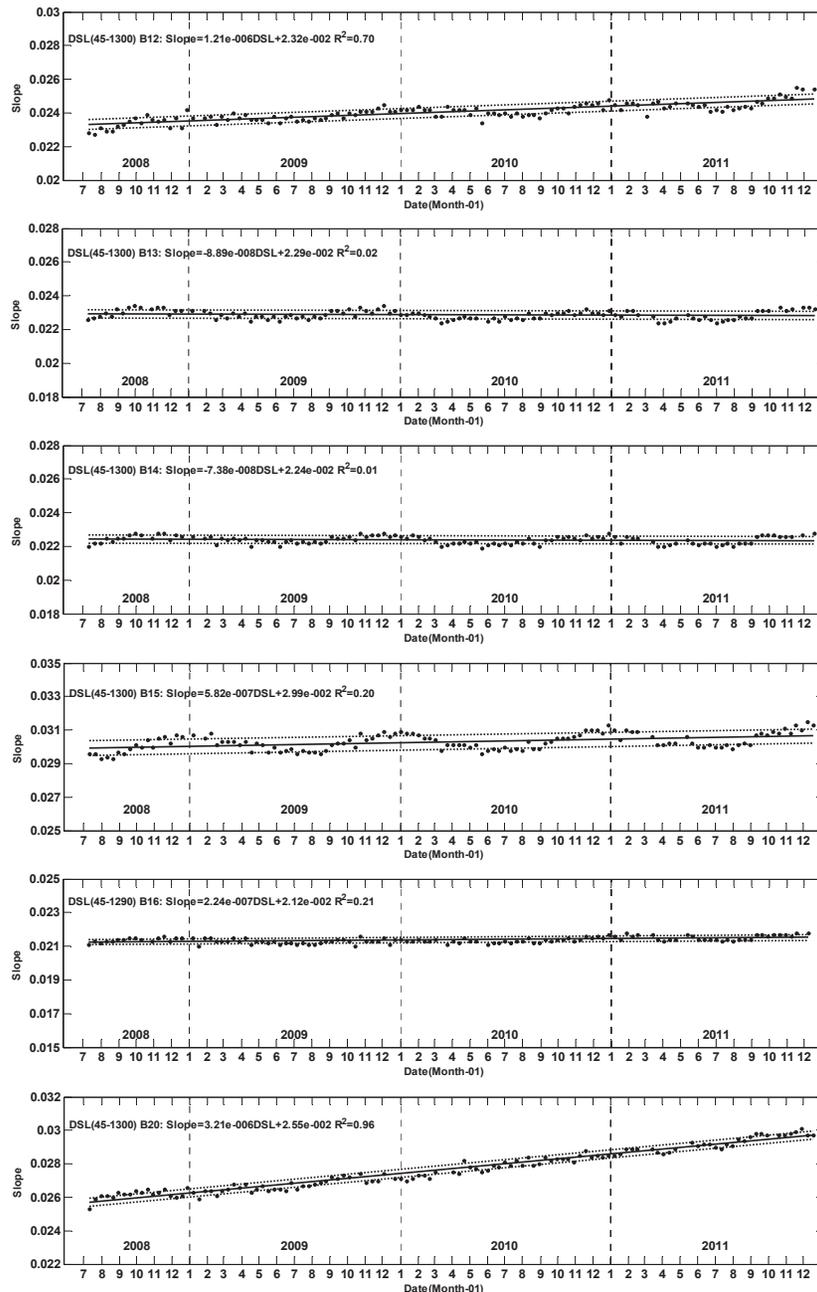


图10 (续) 多场方法获得的14个FY-3A MERSI反射太阳波段的定标斜率时间序列(点图,不包括17~19三个水汽波段和6,7两个短波红外波段)。时间自2008年7月—2011年12月。定标斜率的时间变化呈线性趋势(实线)。虚线表示定标斜率与拟合模型间偏差的标准差

由于该季节性特征与在4.1节中的讨论相似,可以判定其主要由定标方法的不确定性造成。

表3列出了2008年8月—2011年12月的定标跟踪统计分析结果(忽略了波段6,7,17~19),包括定标系数更新模型(2)的参数(即a、b)和不确定性(2σ/mean),以及遥感器响应的年衰变率和总衰变率(至2011年底)。除蓝光波段(如波段1和8~10)以外,定标系数更新模型的不确定性低于3%。MERSI具有极化敏感性,但在发射前并没有对此进行测试。

遥感器接收到的辐射在短波波段受偏振影响较大,这会导致蓝光波段相对较大的不确定性。结果表明,遥感器响应的变化与波长有关。波长小于600nm的波段衰减显著,特别是波段8(412nm),其年衰减率约为9.7%;波长大于900nm的波段同样存在明显衰减,特别是波段20(1.03μm),其年衰减率约为3.9%;大部分红光和近红外波段(600~900nm)相对稳定,年衰减率在±1%以内。针对MODIS的相关研究显示,遥感器的光谱响应函数、中心波长和带宽在发射前的存

表3 多场地方方法得到的FY-3A MERSI反射太阳波段定标跟踪分析结果

波段	a	b	2σ/Mean(%)	年衰减率(%)	总衰减率(%)
1	4.72E-06	0.0306	3.51	4.64	16.71
2	2.29E-06	0.0293	2.67	2.58	9.27
3	-2.05E-07	0.0251	2.39	-0.30	-1.09
4	3.25E-08	0.0286	2.14	0.04	0.15
8	8.98E-06	0.0216	5.69	9.70	34.91
9	5.08E-06	0.0235	4.43	6.05	21.78
10	3.22E-06	0.0245	3.16	4.06	14.60
11	1.98E-06	0.0199	2.92	3.21	11.54
12	1.21E-06	0.0232	2.42	1.78	6.40
13	-8.89E-08	0.0229	2.14	-0.14	-0.51
14	-7.38E-08	0.0224	2.08	-0.12	-0.44
15	5.82E-07	0.0299	2.77	0.69	2.48
16	2.24E-07	0.0212	1.49	0.38	1.36
20	3.21E-06	0.0255	1.72	3.90	14.04

注: σ 为定标斜率与线性回归模型估计值间偏差的标准差; Mean为线性回归模型估计值的均值; 总衰减率为至2011年底的衰减速率

储和在轨运行过程中会发生变化,中心波长随时间和仪器温度会飘移^[31],特别是412nm波段。遗憾的是,MERSI没有在轨的光谱监测装置,因此,无法确定其光谱变化的影响。

4.3 与 CRCS 替代定标和 MODIS 的对比

将在轨定标更新模型得到的FY-3A MERSI定标斜率与2008—2011年的CRCS替代定标结果进行了对比。表4给出了两者之间的相对偏差。可以看出,由公式(2)估算的定标斜率与基于现场测量的CRCS替代定标结果之间的平均相对偏差小于3.8%。

对于MERSI和MODIS之间的对比,需要考虑观测几何和光谱响应差异的影响。对稳定目标使用双差方法时,通过以辐射传输模拟值进行均一化,可以去掉观测几何的影响。然而,对于高精度辐射定标对比,必须考虑光谱响应差异的影响。针对不同的观测几何模拟了沙漠目标的TOA光谱辐射,并采用FY-3A MERSI和Aqua MODIS的光谱响应函数进行了卷积处理。表5给出了使用MERSI和MODIS的光谱响应函数模拟的大气顶反射率间差异的统计结果。可以看出,

表4 FY-3A MERSI多场地定标更新模型估算的定标斜率与敦煌年度CRCS替代定标结果的相对偏差(2008—2011年)

波段	PDif (%)		波段	PDif (%)	
	Mean	Std		Mean	Std
1	-1.36	1.98	11	1.99	1.71
2	1.14	1.82	12	-1.30	1.59
3	0.57	0.80	13	0.66	0.59
4	0.35	0.77	14	3.65	0.49
8	-3.62	2.25	15	3.81	1.05
9	-2.82	2.70	16	1.15	0.79
10	2.30	2.49	20	1.80	1.65

注: PDif=(Slope_{Multisites}-Slope_{CRCS})/Slope_{CRCS}

表5 针对MERSI与MODIS光谱响应函数模拟的沙漠地区大气顶反射率间的偏差信息

MERSI 波段 (CW)	MODIS 波段 (CW)	PDif (%)		Ratio	
		Mean	Std	Mean	Std
1 (0.470)	3 (0.469)	0.18	0.20	1.00	0.002
2 (0.550)	4 (0.555)	1.64	0.44	1.02	0.004
3 (0.650)	1 (0.645)	1.47	0.83	1.01	0.008
4 (0.865)	2 (0.858)	-1.37	0.07	0.99	0.001
6 (1.640)	6 (1.640)	-17.26	0.21	0.83	0.002
7 (2.130)	7 (2.130)	25.69	6.08	1.26	0.061
8 (0.412)	8 (0.412)	2.68	0.71	1.03	0.007
9 (0.443)	9 (0.443)	0.71	1.38	1.01	0.014
10 (0.490)	10 (0.488)	-2.12	1.91	0.98	0.019

注: CW为中心波长(μm); PDif为(Ref_{S_{RF}_MERSI}-Ref_{S_{RF}_MODIS})/Ref_{S_{RF}_MODIS}; Ratio为Ref_{S_{RF}_MERSI}/Ref_{S_{RF}_MODIS}

由光谱响应函数导致的相对偏差在短波红外波段(波段6和7)很高,在其他波段通常低于2%(除波段8和10)。采用线性模型($R^2=1.0$)进行MODIS和MERSI的光谱响应函数影响校正。图11给出了MERSI波段1~4和8~10的 $\Delta Dif / Ref_{MODIS}^{Mea}$ 的归一化频次直方图。可以看出,偏差呈现正态分布。表6列出了使用双差方法得到的匹配波段的对比统计结果。除波段8和9外,MERSI观测值高于MODIS。 $\Delta Dif / Ref_{MODIS}^{Mea}$ 的均值约在5%以内, $\Delta Ratio$ 均值的变化范围为0.97~1.05。

针对不同地表类型的模拟结果表明,光谱响应函数差异的影响在前4个波段较小(结果略),因此,只针对MERSI的波段1~4进行SNO交叉对比。图12给出了2010年8月FY-3A MERSI和Aqua MODIS的大气顶表观反射率散点图。两者表现出良好的一致性,为 R^2 接近1.0且斜率在1~1.3的线性关系。表7列出了MERSI和MODIS的偏差统计结果。MERSI波段1(470nm),2(550nm),3(650nm)和4(865nm)的平均相对偏差分别为0.67%,6.75%,0.54%和-0.76%。MERSI的波段2在波长大于1μm处存在明显的带外响应^[9],是导致较大偏差的原因之一。需要指出的是,由于未进行光谱响应函数的影响校正,这里所给出的偏差统计结果并不能作为定标精度评价。

表6 使用双差方法得到的FY-3A MERSI与Aqua MODIS观测值间的对比结果

MERSI波段 (CW)	MODIS波段 (CW)	$\Delta Dif / Ref_{MODIS}^{Mea}$ (%)		$\Delta Ratio$	
		Mean	Std	Mean	Std
1 (0.470)	3 (0.469)	3.37	2.96	1.03	0.03
2 (0.550)	4 (0.555)	5.40	3.63	1.05	0.03
3 (0.650)	1 (0.645)	3.42	3.34	1.03	0.03
4 (0.865)	2 (0.858)	1.09	2.95	1.01	0.03
8 (0.412)	8 (0.412)	-2.95	3.78	0.97	0.04
9 (0.443)	9 (0.443)	-2.39	2.76	0.98	0.03
10 (0.490)	10 (0.488)	3.84	3.47	1.04	0.03

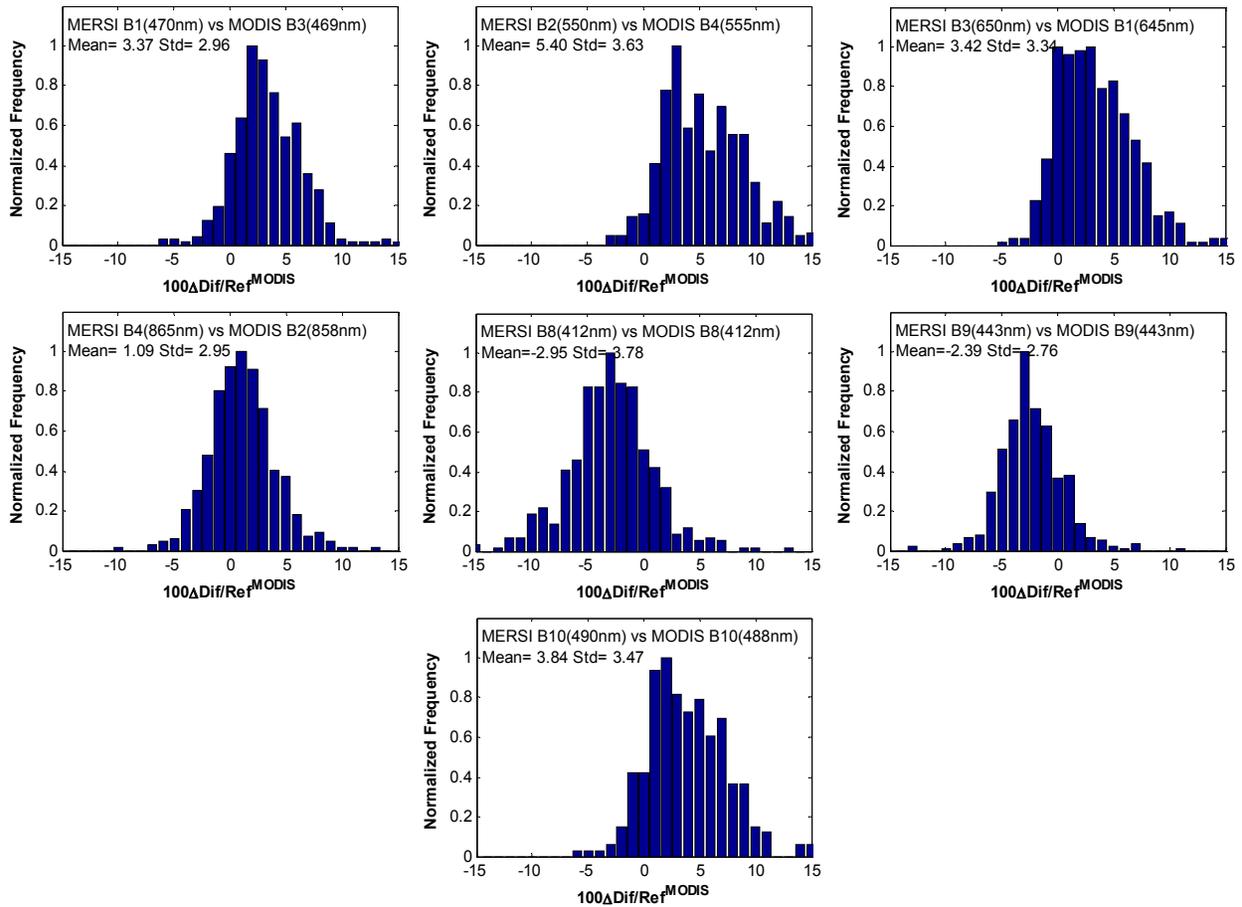


图11 使用双差方法得到的MERSI和MODIS观测值间的相对偏差归一化频次直方图

5 总结和结论

MERSI的实验性设备VOC并不能用于反射太阳波段的绝对定标。之前的在轨定标更新依赖于年度的CRCS场地替代定标试验。然而，每年一次的定标频次远不能满足有效监测仪器响应衰减和在轨定标系数更新的需求。本文提出了一种多场地辐射定标方法，可以提高定标频次。该方法以稳定目标物的辐射传输模拟值作为定标基准，并基于定标系数序列的长期趋势分析建立了定标日更新模型。

以Aqua MODIS为参考评估了MERSI的定标基准，前10个波段（中心波长在0.4~2.1μm）的平均相对偏差在5%之内，标准差在2%~4%之间。相对于

表7 使用SNO方法得到的FY-3A MERSI与Aqua MODIS观测值间的对比结果（2010年8月）

MERSI波段 (CW)	MODIS波段 (CW)	PDif (%)		Ratio	
		Mean	Std	Mean	Std
1 (0.470)	3 (0.469)	0.67	1.85	1.01	0.02
2 (0.550)	4 (0.555)	6.75	3.94	1.07	0.04
3 (0.650)	1 (0.645)	0.54	2.98	1.01	0.03
4 (0.865)	2 (0.858)	-0.76	4.41	0.99	0.04

注：PDif=(Ref_{MERSI}-Ref_{MODIS})/Ref_{MODIS}；Ratio=Ref_{MERSI}/Ref_{MODIS}。

Aqua MODIS的观测值，模拟值具有季节性的偏差特征，其主要原因可能来自对大气特性描述的不准确。MERSI的响应变化与波长有关。波长小于600nm的波段衰减显著，特别是第8波段（412nm），年衰减率约为9.7%；波长大于900nm的波段也有明显衰减；大部分红光和近红外波段（600~900nm）相对稳定，年衰减率在±1%以内。采用了多种方法分析了MERSI定标结果的可靠性。将FY-3A MERSI的定标斜率与CRCS替代定标结果相比，在大多数波段平均相对偏差小于3.8%。采用双差方法评估了MERSI与Aqua MODIS的定标偏差，结果显示在稳定的沙漠地区平均相对偏差基本在5%之内，平均比值在0.97~1.05。此外，用SNO方法进行的分析也显示了较好的一致性。

本文的目的是实现MERSI反射太阳波段高频次和稳定的定标更新。文中的检验结果表明该方法可以满足MERSI 7%的定标精度要求。在后面的研究中，更多的目标场地将被用于定标过程，此外，还需开展更多的真实性检验和分析工作以完成对MERSI定标的进一步评估，包括极化、光谱响应函数和温度订正等。

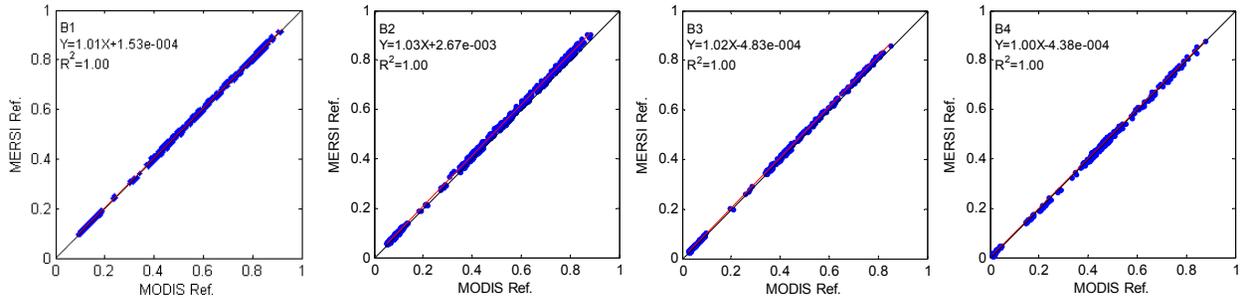


图12 MERSI波段1~4与Aqua MODIS的大气顶表现反射率散点图(2010年8月)

参考文献

- [1] Xiong X, Sun J, Xie X, et al. On-orbit calibration and performance of Aqua MODIS reflective solar bands. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2010, 48(1): 535-546.
- [2] Sun L, Hu X, Guo M, et al. An introduction to FY-3/MERSI, ocean colour algorithm, product and application// *Oceanography*, Marcelli M, Ed. New York: InTech, 2012. Available from: <http://www.intechopen.com/books/oceanography/an-introduction-to-fy-3-mersi-ocean-colour-algorithm-product-and-application>, 2012.
- [3] Zhang Y, Qiu K, Hu X. Vicarious radiometric calibration of satellite FY-1D sensors at visible and near infrared channels. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 18(4): 505-516.
- [4] Biggar S F, Thome K J, Wisniewski W. Vicarious radiometric calibration of EO-1 sensors by reference to high-reflectance ground targets. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1174-1179.
- [5] Kaufman Y J, Holben B N. Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. *Int J Remote Sen*, 1993, 14(1): 21-52.
- [6] Govaerts Y M, Clerici M, Clerbaux N. Operational calibration of the Meteosat radiometer VIS band. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1900-1914.
- [7] Okuyama A, Hashimoto T, Nakayama R, et al. Geostationary imager visible channel recalibration// *Proc EUMETSAT Meteorol Satellite Conf*, Bath, UK, 2009.
- [8] Rao C R N, Chen J. Revised post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on the NOAA-14 spacecraft. *Int J Remote Sen*, 1999, 20(18): 3845-3491.
- [9] Wu X, Sullivan J T, Heidinger A K. Operational calibration of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) visible and near-infrared channels. *Can J Remote Sensing*, 2010, 36(5): 602-616.
- [10] Loeb N G. In-flight calibration of NOAA AVHRR visible and near-IR bands over Greenland and Antarctica. *Int J Remote Sen*, 1997, 18(3): 477-490.
- [11] Tahnk W R, Coakley J A. Updated calibration coefficients for NOAA-14 AVHRR channels 1 and 2. *Int J Remote Sen*, 2001, 22(15): 3053-3057.
- [12] Doelling D R, Hong G, Morstad D, et al. The characterization of deep convective cloud albedo as a calibration target using MODIS reflectances. *Proc SPIE*, 2010, 7862, 78620I, doi:10.1117/12.869577.
- [13] Sohn B-J, Ham S-H, Yang P. Possibility of the visible-channel calibration using deep convective clouds overshooting the TTL. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48: 2271-2283.
- [14] Barnes W, Xiong X, Eplee R, et al. Use of the Moon for calibration and characterization of MODIS, SeaWiFS, and VIRS// *Earth Science Satellite Remote Sensing, Vol 2: Data, Computational Processing, and Tools*, New York: Springer, 2006.
- [15] Cao C, Vermote E, Xiong X. Using AVHRR lunar observations for NDVI long-term climate change detection. *J Geophys Res*, 2009, 114, D20105, doi:10.1029/2009JD012179.
- [16] Heidinger A K, Cao C, Sullivan J T. Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels. *J Geophys Res*, 2002, 107, D23, doi:10.1029/2001JD002035.
- [17] Liu J, Li Z, Qiao Y L, et al. A new method for cross-calibration of two satellite sensors. *Int J Remote Sen*, 2004, 25(23): 5267-5281.
- [18] Hu X, Liu J, Sun L, et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyen(FY) series sensors. *Can J Remote Sensing*, 2010, 36(5): 566-582.
- [19] 孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的FY-3 MERSI反射太阳波段在轨响应变化分析. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1869-1877.
- [20] Hu X, Sun L, Liu J, et al. Calibration for the solar reflective bands of Medium Resolution Spectral Imager onboard FY-3A. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2012, 50: 4915-4928.
- [21] Cosnefroy H, Leroy M, Briottet X. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 101-114.
- [22] Clark D K, Gordon H R, Voss K J, et al. Validation of atmospheric correction over the oceans. *J Geophys Res*, 1997, 102: 17209-17217.
- [23] Kotchenova S Y, Vermote E F, Matarrese R, et al. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path Radiance. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6762-6774.
- [24] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens Environ*, 2002, 83:135-148.
- [25] Remer L A, Tanre D, Kaufman Y J, et al. The MODIS aerosol algorithm, products and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62: 947-973.
- [26] McPeters R, Kroon M, Labow G. et al. Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument total column ozone product. *J Geophys Res*, 2008, 113, D15S14, doi:10.1029/2007JD008802.
- [27] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77(3): 437-471.
- [28] Govaerts Y M, Clerici M. Evaluation of radiative transfer simulations over bright desert calibration sites. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(1): 176-187.
- [29] Xiong X, Wu A, Wenny B, et al. Progress and lessons from MODIS calibration intercomparison using ground test sites. *Can J Remote Sensing*, 2010, 36(5): 540-552.
- [30] Tobin D C, Revercomb H E, Knuteson R O, et al. Radiometric and spectral validation of Atmospheric Infrared Sounder observations with the aircraft-based Scanning High-Resolution Interferometer Sounder. *J Geophys Res*, 2006, 111, D09S02, doi:10.1029/2005JD006094.
- [31] Xiong X, Che N, Barnes W L. Terra MODIS on-orbit spectral characterization and performance. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2198-2206.