

光学学报

我国西北部沙漠定标场网的地表反射率光谱特征模型

何兴伟, 胡秀清*, 何灵莉, 王玲, 陶炳成, 胡文杰, 冯小虎

国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 选取中国西北地区 10 个典型的用于辐射定标及仪器性能追踪的辐射定标场, 在卫星过境时利用地面手持光谱仪和低空无人机(UAV)同步观测反射率光谱, 系统比较了多个场地的反射率光谱差异, 并开展了多个场地的光谱特征分析和参数建模研究。同一个场地一天内不同时间的光谱形状变化很小, 光谱角小于 5° , 光谱幅度的变化主要受太阳天顶角和大气状况的影响, 光谱幅度在不同天的同一时刻变化很小。不同场地的光谱形状和幅度差异较大。同一场地不同观测尺度下的光谱曲线基本吻合。通过分析发现, 当波长小于 1100 nm 时, 所有沙漠场的光谱曲线形状与三角反正切函数曲线相似。基于反正切函数进行地表反射率光谱建模, 各场地实测光谱与模拟光谱的均方根误差均在 0.6% 以内, 相关系数均在 0.99 以上, 表明四参数光谱模型能够准确地描述沙漠场的反射率光谱。用模型计算的地表反射率替代场地实测的地表反射率进行 FY-3D 中分辨率光谱成像仪(MERSI)场地定标, 可以发现, 与基于实测光谱计算的结果相比, 利用该模型得到的 MERSI 各个波段的相对偏差小于 3%, 表明构建的沙漠四参数反射率光谱模型可以很好地应用在 MERSI 的定标中。

关键词 遥感; 地表反射率光谱; 沙漠定标场网; 反正切函数; 光谱建模

中图分类号 TP731

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0628003

Surface Reflectance Spectral Characteristic Model of Desert Calibration Site Network in Northwest China

He Xingwei, Hu Xiuqing*, He Lingli, Wang Ling, Tao Bingcheng, Hu Wenjie, Feng Xiaohu

National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract Ten typical radiometric calibration sites are selected for radiometric calibration and instrument performance tracking in northwest China. Simultaneous observation of reflectivity spectrum is realized by ground hand-held spectrometer and low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) during satellite transit. The reflectance spectral differences of multiple sites are compared systematically, and the spectral characteristic analysis and parameter modeling of multiple sites are carried out. The spectral shape of the same site varies little at different time in one day, and the spectral angle is less than 5° . The variation of spectral amplitude is mainly affected by solar zenith angle and atmospheric conditions, and the spectral amplitude varies little at the same time in different days. The spectral shapes and amplitudes of different sites are quite different. The spectral curves of the same site at different observation scales are basically the same. Through the analysis, it is found that when the wavelength is less than 1100 nm, the spectral curves of all desert sites are similar to the curves of triangular arctangent function. Based on the arctangent function, the surface reflectance spectral modeling is carried out. The root mean square error of the measured and simulated spectra of each site is within 0.6%, and the correlation coefficient is above 0.99. The results show that the four-parameter spectral model can accurately describe the reflectance spectra of desert sites. The surface reflectance calculated by the model is used to calibrate the FY-3D medium resolution spectral imager (MERSI) site instead of the measured surface reflectance, it is found that compared with the results calculated based on the measured spectra, the relative deviation of each band of MERSI obtained by the model is less

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-08-19; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFB0504900, 2018YFB0504901)、国家自然科学基金(41871249)

通信作者: *huxq@cma.gov.cn

than 3%, indicating that the desert four-parameter reflectance spectral model can be well applied to the calibration of MERSI.

Key words remote sensing; surface reflectance spectrum; desert calibration site network; arctangent function; spectral modeling

1 引言

由于定量遥感信息的精确提取和广泛应用必须建立在高定标精度的遥感观测数据基础之上,因此卫星传感器辐射定标理论和方法得到了快速发展。常用的定标方法可以分为发射前定标、星上定标和在轨替代定标^[1]。卫星发射之前需要利用地面设备检验仪器性能以提供辐射定标参数。卫星在发射过程及在轨业务运行期间太空环境恶劣,遥感器的性能和灵敏度会逐年降低,因此卫星发射初期就需要进行遥感器的在轨监测。星上定标通过追踪遥感器对星载稳定辐射源(如漫反射板)的辐射响应计算定标系数,如中分辨率成像光谱仪(MODIS)、SeaWiFS等具有完善的星上定标系统,定标结果的不确定性可达到2%^[2-4]。对于没有搭载星上定标系统的遥感器(如AVHRR)或者由于其他因素导致星上定标器不能作为定标基准源的遥感器[如中分辨率光谱成像仪(MERSI)],只能依靠在轨替代定标方法^[5-7]。

基于地面辐射定标场对遥感器进行定标是星载遥感器常用的在轨替代定标方法^[8]。场地替代定标就是在卫星过境时,同步观测地表反射率与水汽、臭氧和气溶胶光学厚度(AOD)等大气参数,利用6S、MODTRAN等辐射传输模式计算相同观测几何下的天顶辐亮度,与遥感器所观测到的数据[DN(digital number)值]进行比较获取定标系数。基于定标场的在轨替代定标方法能够很好地评估遥感器的辐射性能、准确监测遥感器的性能变化和衰减情况,定标精度可达到5%^[9-11]。

场地替代定标结果主要受各种实测数据和模式模拟精度的影响。为了减小定标场对定标结果精度的影响,一般选取沙漠、冰雪等地表特征稳定、空间均一和大气组分变化较小的场地。同时,选取的定标场要足够大,能够与不同空间分辨率的卫星遥感器视场所匹配,满足不同遥感器的定标需求^[12]。国际地球观测卫星委员会(CEOS)的红外可见光遥感器定标小组(WGCV IVOS)在全球选取了5个稳定目标和8个标准定标场^[13],其中包括中国的敦煌定标场,该定标场被广泛用于遥感器的辐射定标和性能追踪研究中。北美的Sonoran Desert and Railroad

Valley sites、中东的Arabian Desert、澳大利亚的Simpson Desert等场地也是常用的定标场^[14-17]。近年来,中国西北的敦煌、塔克拉玛干、巴丹吉林沙漠地区的一些场地也常被作为辐射定标场进行遥感器的定标研究和响应跟踪^[18-20]。然而,目前国内还没有足够数量的定标场来构建不同亮度等级的定标场网以满足日益增长的定标需求。为了更好地对我国的卫星进行精确的在轨辐射定标,Hu等^[21]在中国西北沙漠地区初步选取了30多个稳定沙漠场组成沙漠辐射定标场网,为气象、陆地和海洋等多系列国产卫星数据提供了统一的辐射定标基准。

目前场地定标需要的地表反射率光谱主要通过野外试验测量获得,实地测量使用的仪器主要有野外光谱仪ASD和光谱辐射计SVC。2014年,中国科学院安徽光学精密机械研究所在敦煌开展辐射定标试验,使用SVC和ASD两种仪器对敦煌定标场进行地表反射率光谱测量^[22]。2018年,国家卫星气象中心联合中国科学院安徽光学精密机械研究所在青海湖开展星地同步观测的红外定标试验,完成FY-3D卫星MERSI-II两个热红外通道的辐射定标^[23]。2019年和2020年连续两年,国家卫星气象中心在敦煌、青海湖以及柴达木盆地周边开展定标试验,针对第二代静止气象卫星FY-4A和第二代极轨气象卫星FY-3C、FY-3D以及美国的Aqua、NOAA等卫星的光学载荷开展星地同步观测以获取地表反射率光谱和各种大气参数,并基于辐射传输模式计算定标系数。

场地替代定标是一种有效的辐射定标方法,定标精度较高,但是它也存在一定的局限性。首先,符合光谱时间稳定、空间均一特征的场地一般分布在沙漠、极地冰雪等偏远地区,完成一次定标试验成本较高。其次,场地试验很容易受到天气条件的影响,每年只能在特定的时间开展定标试验,一次试验能够实测的有效数据有限。这些因素导致场地定标频次低,进而没有足够的样本数据进行载荷的衰减跟踪和订正^[24]。为满足日益增长的高频次、高精度的定标需求,可以利用地面或者卫星等实测的光谱数据构建定标场的光谱模型,结合高精度的卫星产品(如MODIS)提供的大气参数,基于辐射传输模式进行遥感器的绝对辐射定标。该方法能明显地降低定

标成本,极大地提高定标频次和精度,有效地进行仪器的衰减跟踪和订正^[25]。

本文选取了中国西北地区的 10 个沙漠场开展地表反射率光谱试验。首先,基于试验数据分析了场地的光谱特征。然后,构建了反正切四参数地表反射率光谱模型,并评估了模型的精度。最后,基于构建的光谱模型正演计算了大气顶层反射率,并评估了四参数模型在定标中的适用性。

2 中国西北沙漠定标场网选取

为了尽可能地减小定标场对定标精度的影响,选取定标场时需满足以下条件^[26]:

1) 地表反射率大于 0.3,可保证遥感器能够接收足够强的有效信号,提高信噪比,降低噪声的影响。

2) 地表反射率光谱空间分布均一,可减小空间匹配带来的定标误差。时间分布稳定且无明显的季节变化可降低时间匹配误差带来的影响。光谱曲线平滑可减小光谱响应差异的影响。

3) 场地地势平坦、面积大可满足不同尺度遥感器的辐射定标需求。

4) 大气干洁稳定可减小大气参数对定标精度的影响。

在中国满足上述 4 个条件的场地主要分布在新疆、甘肃和内蒙古等西北地区,Hu 等^[21]参考国际同类研究对场地评价的指标参数利用卫星数据在中国西北地区初步筛选了 30 多个稳定沙漠场。本团队对卫星遴选场地进行实地踏勘,通过对后勤保障、通达性以及场地实际情况的调研分析了在初选场地开展综合试验的可行性,最后选取了分布在青海、甘肃和内蒙古的 10 个典型场地进行地表反射率光谱观测和建模。10 个场地的地理经纬度信息如表 1 所示。

3 场地观测试验

3.1 地面观测试验

为了对风云系列卫星进行在轨场地替代定标和精度评估,在敦煌及其周边地区开展星地同步观测试验。本文选取 2019 年和 2020 年试验实测的地表反射率光谱数据进行研究分析,地表反射率光谱数据主要包括:1)手持 SVC 或者 ASD 进行地面跑场观测得到的或者定点垂直对地观测得到的地表反射率;2)利用无人机搭载 SVC 在不同的高度测量地表反射率。

表 1 10 个定标场的经纬度信息

Table 1 Latitude and longitude information of 10 calibration sites

Site	Longitude / (°)	Latitude / (°)	Full name
YCZG	96.220	37.320	Yangchangzigou
SHDBAN	94.482	38.721	Shidaoban
DAZH_E	94.192	36.450	Dazaohuo_East
DAZH_W	93.796	36.581	Dazaohuo_West
XCDH_W	95.075	37.432	Xiaochaidan_West
DHUANG	94.270	40.180	Dunhuang
BDJL	99.817	40.278	BadainJaran
ALSH	105.150	38.687	Alashan
WHAI_W	106.637	39.668	Wuhai_West
MQIN	103.320	38.437	Minqin

在敦煌使用 ASD 进行地表反射率光谱的垂直测量,测量区域面积为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 。考虑到太阳天顶角变化对测量结果的影响,测量时间限制在卫星过境前后 1 h 内,并设置多个采样点进行卫星过境时的加密跑场观测。对每一个采样点分别测量目标和标准参考板反射的光谱辐亮度 $R_g(\theta_s, \varphi_s, 0^\circ, \varphi_v, \lambda)$ 和 $R_r(\theta_s, \varphi_s, 0^\circ, \varphi_v, \lambda)$,其中 λ 为波长, θ_s 和 φ_s 为太阳的天顶角和方位角, φ_v 为观测方位角,观测天顶角为 $\theta_v = 0^\circ$ 。在每个采样点处先测量一次参考板,然后连续测量 5 次地表,最后再测量 1 次参考板。对试验数据处理前首先进行质量检验,选取有效数据,5 次地表测量时间有一定的差异,对应的地表反射率会随着太阳天顶角的变化而变化,因此有效地表反射率数据的判识标准为地表反射率标准差小于 10%。参考板前后 2 次测量的时间间隔不超过 1 min,此时可以假设反射率不变,故参考板有效测量数据的判识标准为参考板反射率标准差小于 5%。

在其他 9 个场地使用 SVC 进行连续定点垂直观测,采样间隔为 15 min。为了减少采样的随机误差,每次采样时先连续测量 3 次参考板,再连续测量 3 次地表。在处理测量数据之前先进行质量检验,剔除异常值,再分别计算目标和参考板反射的光谱辐亮度 $R_g(\theta_s, \varphi_s, 0^\circ, \varphi_v, \lambda)$ 和 $R_r(\theta_s, \varphi_s, 0^\circ, \varphi_v, \lambda)$ 。

基于参考板和地表目标的测量值及参考板反射率计算地表反射率 ρ_g ,其表达式为

$$\rho_g(t) = \rho_r \times R_g(\theta_s, \varphi_s, 0^\circ, \varphi_v, \lambda) / R_r(\theta_s, \varphi_s, 0^\circ, \varphi_v, \lambda), \quad (1)$$

式中: ρ_r 为参考板在 t 时刻经过太阳天顶角订正后的反射率。采样时地表和参考板辐射亮度的观测间隔要尽可能得小, 以保证测量每个采样点时太阳位置基本不变。

3.2 无人机观测试验

为了研究辐射校正场对不同空间分辨率遥感器定标精度的影响, 充分考虑地基设备测量的地表反射率与不同卫星载荷对应分辨率观测间的关系, 在十道班, 小柴旦湖西和羊肠子沟开展无人机(UAV)观测试验。具体的试验方案: 使用 UAV 搭载 SVC 在不同高度(50, 100, 200, 300 m)处测量选取的均匀目标的反射率, 试验过程中 UAV 起飞前先测量 1 次白板, 并在完成地面反射率测量后再次测量白板。UAV 观测方案示意图如图 1 所示。

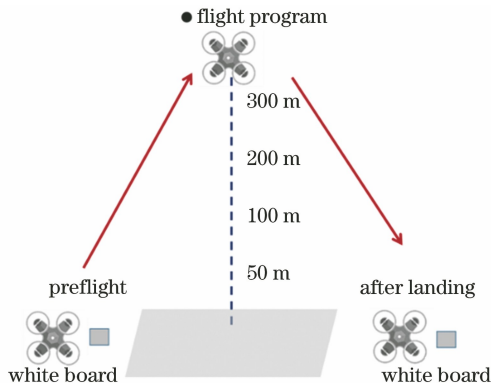


图 1 UAV 观测方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of UAV observation scheme

4 光谱分析与建模

4.1 多场地光谱比较

图 2(a)、(b) 分别展示了小柴旦湖西、十道班一天内不同时间处试验测量的地表反射率光谱。可以发现, 同一天内不同时间测量的光谱形状基本不变, 光谱幅度主要受太阳天顶角和大气状况的影响。另外, 地物光谱仪的信号在 1900 nm 波长附近及波长大于 2300 nm 的光谱范围处受到较强的干扰, 光谱波动性较大, 后文在对光谱特征进行定量分析时, 认为此光谱范围的数据是无效的, 故不进行展示和分析。在图 2(c) 中, 比较了敦煌、小柴旦湖西与十道班在不同天的相同(或者邻近)时间的反射率光谱, 其中小柴旦湖西、十道班每个场地的两条光谱均选自 2019 年光谱试验, 观测时间为当地时间 12:00, 每个场地的两条光谱形状和幅度一致性非常好。敦煌的两条光谱曲线分别由 20190812T1200 和 20200922T1311 的试验获得, 由于观测时间和日期

不同, 故太阳天顶角等引起光谱幅度的变化相对较大。在图 2(d) 中, 将另外 3 个不同亮度等级的场地(大灶火西、大灶火东和羊肠子沟)与图 2(c) 中的 3 个场地一起进行了光谱特征比较。可以看到, 不同场地的反射率光谱的亮度等级差异较大, 其中敦煌的光谱曲线最为平坦, 其他 5 个场地的光谱形状相似。

通过图 2 不同场地不同时间光谱特征的对比分析可以发现, 同一场地不同时间的反射率光谱形状类似, 光谱日变化主要受太阳天顶角和大气状况的影响。不同场地的光谱形状差异较大, 光谱形状主要由地表物理特征决定。对于同一场地, 当没有降雨、降雪等异常天气造成地表物理特性变化时, 场地的光谱形状变化很小。所有场地的光谱曲线均表现出相似的光谱特征, 即光谱反射率在 450 nm 波长以下较低, 在 550~600 nm 波长范围内迅速增加, 在 800 nm 波长以上趋于平稳。不同场地光谱曲线的区别主要为 550 nm 波长附近曲线斜率以及在波长为 450 nm 和 800 nm 附近反射率值不同, 因此可以采用反正切函数来准确地描述沙漠场小于 1100 nm 波长范围内的光谱曲线。

4.2 不同观测尺度下的光谱比较

在图 3(a) 中, 比较了小柴旦湖西和十道班 SVC 实测的地表反射率光谱和对应的相同(或者邻近)时间处利用 MCD43C1 产品双向反射分布函数(BRDF)模型参数计算的 7 个通道的地表反射率。可以看出, SVC 实测的地表反射率光谱与 MCD43 反射率产品的反射率光谱具有较高的一致性。在图 3(b) 中, 比较了两个场地中 UAV 与 SVC 不同观测尺度下的反射率光谱。可以发现, 小柴旦湖西的两条光谱曲线基本吻合。对于十道班: 当波长小于 1000 nm 时, 两条光谱曲线一致性较好; 当波长大于 1000 nm 时, 两条光谱曲线存在一定的偏差。

为了定量分析不同反射率光谱曲线的差异, 使用光谱角 θ 来描述不同光谱曲线间的形状特征, 光谱角的表达式为

$$\theta = \arccos \left[\left(\frac{\mathbf{X}}{|\mathbf{X}|} \right)^T \frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|} \right] = \arccos(\mathbf{X}_u^T \mathbf{Y}_u), \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 为两条不同的反射率光谱向量; $\mathbf{X}_u = \frac{\mathbf{X}}{|\mathbf{X}|}$; $\mathbf{Y}_u = \frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|}$ 。光谱角与两条光谱曲线形状的差异程度有关, 与光谱辐亮度无关, 如图 4 所示。光谱向量 \mathbf{B} 和 \mathbf{D} 的辐亮度相同, 二者与 \mathbf{A} 构成的光

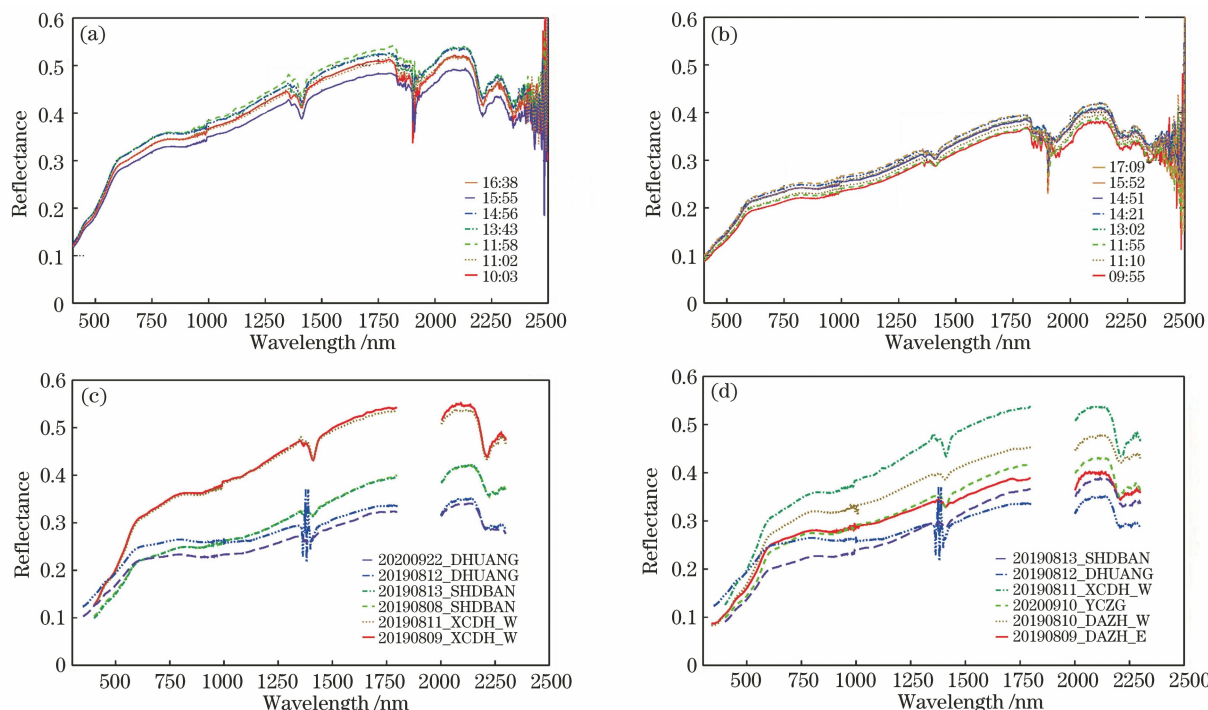


图 2 不同场地不同时间的地表反射率光谱。(a) 2019 年 8 月 11 日 XCDH_W 不同时间的地表反射率光谱;(b) 2019 年 8 月 13 日 SHDBAN 不同时间的地表反射率光谱;(c) XCDH_W、SHDBAN 和 DHANG 在相同或临近时刻的光谱对比;(d) XCDH_W、SHDBAN、DHANG、YCZG、DAZH_E 和 DAZH_W 的反射率光谱对比

Fig. 2 Surface reflectance spectra of different sites at different times. (a) Surface reflectance spectra of XCDH_W at different times on August 11, 2019; (b) surface reflectance spectra of SHDBAN at different times on August 13, 2019; (c) spectral comparison among XCDH_W, SHDBAN and DHANG at same time or adjacent time; (d) Comparison of reflectance spectra among XCDH_W, SHDBAN, DHANG, YCZG, DAZH_E and DAZH_W

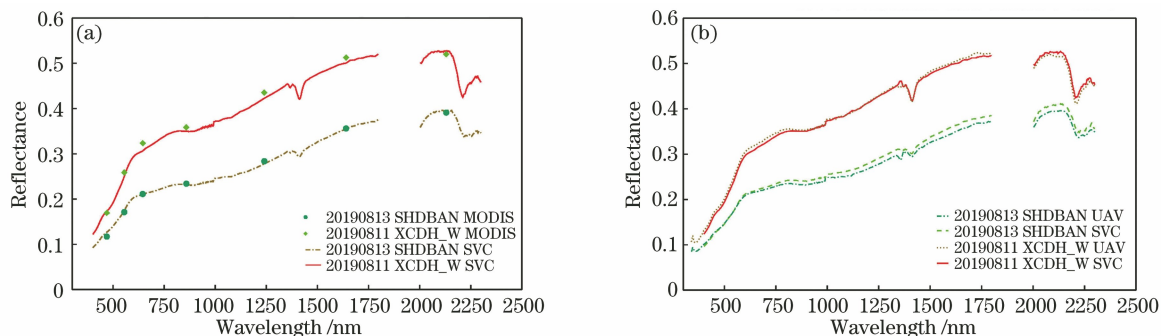


图 3 不同观测尺度下的地表反射率光谱。(a) XCDH_W 和 SHDBAN 处 SVC 实测的地表反射率光谱和 MCD43 反射率产品的光谱的对比;(b) XCDH_W 和 SHDBAN 处 UAV 和 SVC 实测的地表反射率光谱对比

Fig. 3 Surface reflectance spectra at different scales. (a) Comparison between surface reflectance spectra measured by SVC and spectra of MCD43 reflectance product at XCDH_W and SHDBAN; (b) comparison between surface reflectance spectra measured by UAV and SVC at XCDH_W and SHDBAN

谱角不同,分别为 θ_2 和 θ_1 。虽然 **B** 和 **C** 的光谱辐射亮度不同,但是二者与 **A** 构成的光谱角相同,均为 θ_2 。当光谱角 θ 小于 5° 时,假定两条反射率光谱的形状相同^[15]。

表 2 为十道班和小柴旦湖西两个场地处 SVC 与 MODIS 观测间反射率的相对偏差。可以发现,

SVC 与 MCD43 的 7 个波段反射率的相对偏差基本在 5% 以内。表 3 为十道班和小柴旦湖西两个场地处 SVC 和 UAV 观测的反射光谱的光谱角、均方根误差 (RMSE) 和相关系数 R 。可以发现, SVC 与 UAV 实测的反射率光谱曲线的光谱角小于 2° , 十道班和小柴旦湖西两种观测尺度下的反射率光谱的

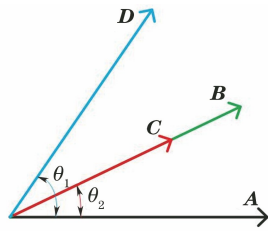


图 4 光谱角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spectral angle

表 2 SVC 与 MODIS 观测间反射率的相对偏差

Table 2 Relative deviation of reflectance between SVC and MODIS observations

unit: %

Site	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7
SHDBAN	-0.702	-1.028	7.628	2.435	-1.970	-0.672	1.357
XCDH_W	-5.599	-2.492	2.154	-2.936	-2.938	-2.502	1.208

表 3 SVC 和 UAV 观测的反射光谱的光谱角、RMSE 和 R
Table 3 Spectral angle, RMSE and R of reflectance spectra observed by SVC and UAV

Site	Spectral angle / (°)	RMSE / %	R
SHDBAN	1.325	0.214	0.930
XCDH_W	1.855	0.106	0.976

4.3 四参数反射率光谱模型构建

基于 4.1 和 4.2 节对中国西北沙漠场反射率光谱特征的分析,参考 Miesch 等^[27]提出的光谱模型,当光谱波长小于 1100 nm 时,构建沙漠场四参数反射率光谱模型,其表达式为

RMSE 小于 0.2%, 相关系数 R 分别为 0.930 和 0.976。地表、UAV 实测的地表反射率光谱与 MODIS 卫星的地表反射率产品光谱的一致性很好,说明选取的辐射定标场空间均一性较好。使用不同观测尺度下获取的反射率光谱可构建地表反射率光谱模型,包括试验实测的地表反射率光谱和高精度的卫星高光谱数据。

$$\rho_{\text{mod}}(\lambda) = A \frac{2}{\pi} \arctan[\alpha(\lambda - \beta)] + B, \quad (3)$$

式中: A 、 α 、 β 和 B 为 4 个模型参数。图 5 展示了地表反射率随 4 个参数的变化,其中 ΔA 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ 和 ΔB 分别为四个参数的变化量。借助 MODIS 地表反射率产品分析中国西北沙漠地区地表反射率特征得到先验知识以确定 4 个参数的初始值,设置 A 、 α 、 β 和 B 的初始值分别为 0.1, 0.01, 520 和 0.22。分别改变单个参数值重新计算地表反射率,分析参数变化对地表反射率光谱的影响。可以看出, A 表征整个反射率光谱曲线的变化幅度, α 为光谱在 β 拐点位置的

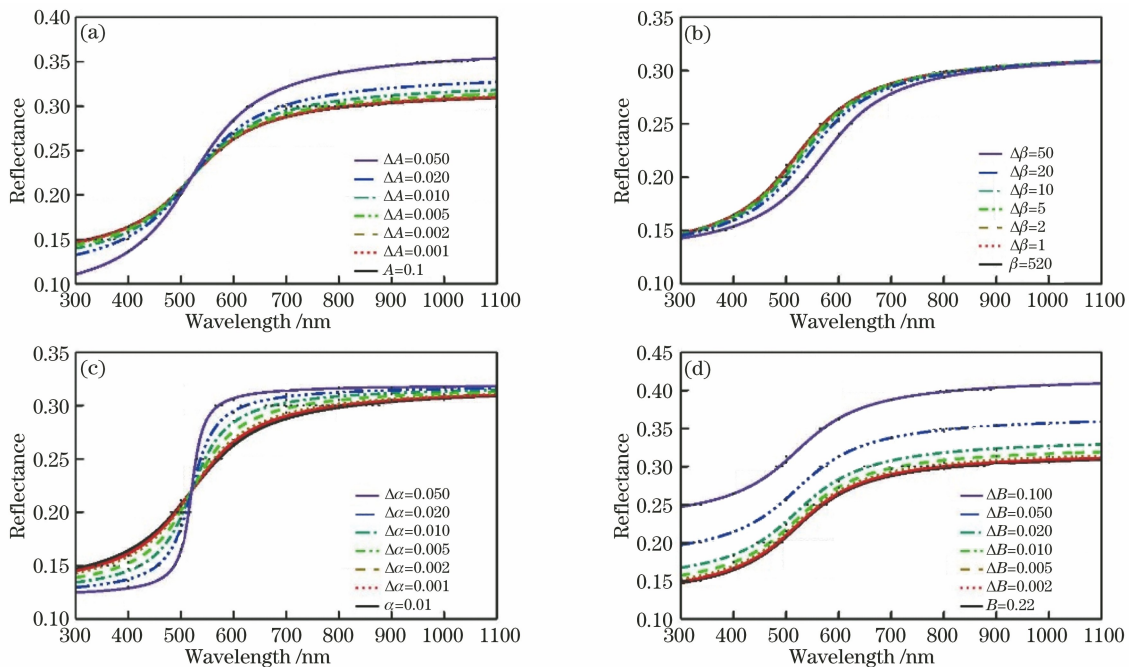


图 5 地表反射率随四参数变化的敏感性分析。(a)地表反射率随 A 的变化;(b)地表反射率随 β 的变化;(c)地表反射率随 α 的变化;(d)地表反射率随 B 的变化

Fig. 5 Sensitivity analysis of surface reflectance with four parameters. (a) Surface reflectance varying with A ; (b) surface reflectance varying with β ; (c) surface reflectance varying with α ; (d) surface reflectance varying with B

斜率, β 表征光谱曲线在 550 nm 波长附近的拐点位置, B 决定光谱曲线的截距。

基于四参数反射率光谱模型, 采用最小二乘法对 10 个沙漠场试验实测的光谱进行拟合得到模型参数, 计算 RMSE 和 R 以评价模型精度。图 6 展示了 10 个场地的实测光谱与四参数模型模拟光谱的对比, 其中虚线为实测地表反射率光谱(original), 实线为模型模拟光谱(polyfit)。当波长小于 1000 nm 时, 两条光谱曲线的一致性很好, 光谱模型精确地模拟了地物的光谱特征。当波长大于 1000 nm 时, 光谱差异相对较大。

表 4 列出了 10 个场地拟合得到的四参数以及用于评估模型精度的 RMSE 和 R 。可以发现, 所有场地的 RMSE 均小于 0.6%; ALSH 的 RMSE 最大, 其值为 0.58%; SHDBAN 的 RMSE 最小, 其值为 0.34%; 决定系数 R 均大于 0.99; WHAI_W、ALSH 和 BDJL 3 个场地的 4 个参数除了 B 差异较大以外, 其他 3 个参数值非常接近, 光谱特征一致性最好, 如图 6(a) 所示。表 4 表明仅用 4 个参数构建的反射率光谱模型就能够很好地模拟不同沙漠场在可见光近红外波段的反射率光谱。

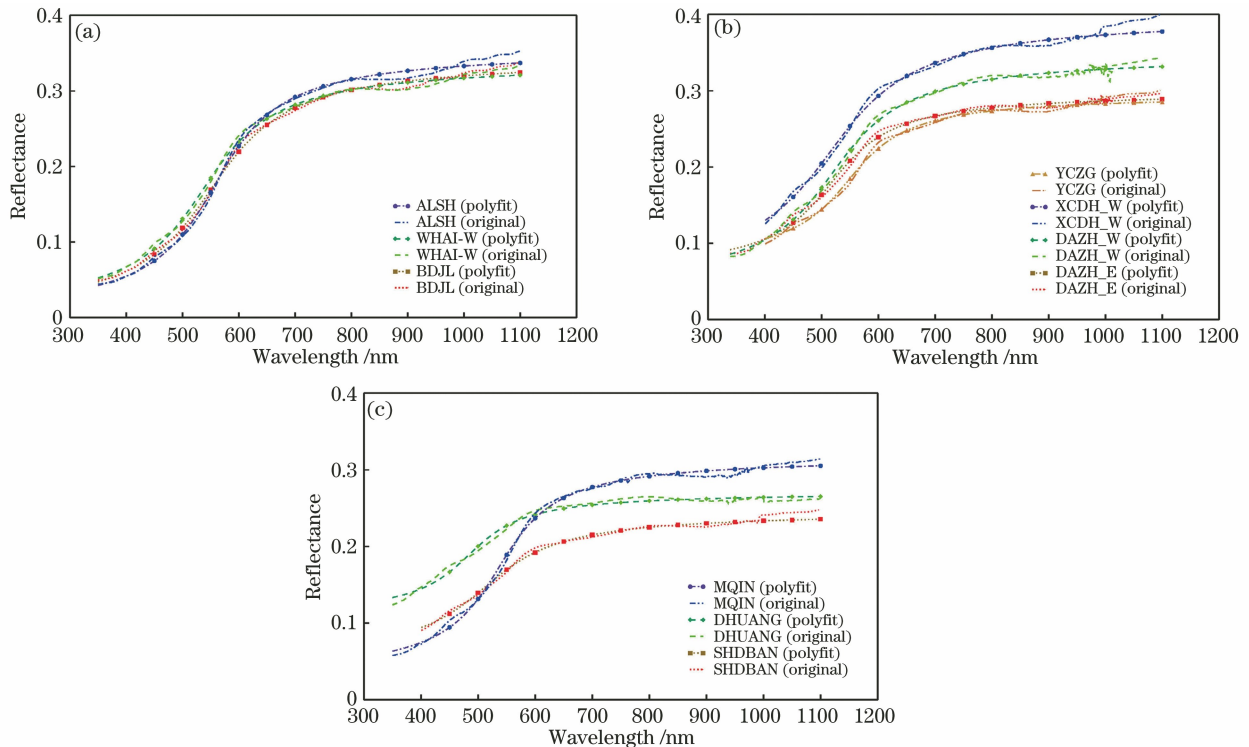


图 6 定标场实测反射率光谱与模拟光谱比较。(a) ALSH、WHA1_W、BDJL; (b) YCZG、XCDH_W、DAZH_W、DAZH_E; (c) MQIN、DHUANG、SHDBAN

Fig. 6 Comparison between measured and simulated reflectance spectra of calibration sites. (a) ALSH, WHAI_W, BDJL; (b) YCZG, XCDH_W, DAZH_W, DAZH_E; (c) MQIN, DHUANG, SHDBAN

表 4 不同场地的光谱模型参数和统计因子

Table 4 Spectral model parameters and statistical factors for different sites

Site	Date	A	α	β	B	RMSE / %	R
XCDH_W	20190811	0.1793	515.6907	0.2203	0.0088	0.57	0.9970
YCZG	20190810	0.1126	547.8787	0.1830	0.0125	0.45	0.9970
DAZH_E	20190809	0.1211	516.6077	0.1787	0.0120	0.44	0.9978
DAZH_W	20190810	0.1558	519.3605	0.1923	0.0103	0.47	0.9983
ALSH	20200907	0.1795	557.8375	0.1760	0.0113	0.58	0.9984
WHA1_W	20200904	0.1687	536.9448	0.1702	0.0104	0.52	0.9984
BDJL	20200918	0.1758	550.5018	0.1696	0.0096	0.50	0.9986
SHDBAN	20190813	0.0994	512.0815	0.1469	0.0099	0.34	0.9966
DHUANG	20190812	0.0824	483.9507	0.1891	0.0134	0.44	0.9943
MQIN	20200917	0.1450	536.4028	0.1726	0.0131	0.48	0.9983

4.4 四参数模型应用

为了评估四参数模型模拟的地表反射率光谱在场地定标中的适用性,选取十道班和小柴旦湖西处 SVC 试验实测的反射率光谱数据和太阳光度计、手持气象站等设备星地同步测量的水汽、臭氧和 AOD 等大气参数,如表 5 所示,其中 $1 \text{ atm}\cdot\text{cm} = 2.1415 \times 10^{-2} \text{ kg}/\text{m}^2$ 。基于 6S 辐射传输模式模拟 MERSI 各个通道的大气顶层反射率 $\rho_{\text{svc}}^{\text{TOA}}$,然后修改 6S 的输入参数,用四参数模型模拟的反射率替代 SVC 实测的地表反射率,重新计算 MERSI 各通道的 $\rho_{4\text{Par}}^{\text{TOA}}$,

表 5 SHDBAN 和 XCDH_W 的观测几何和大气参数

Table 5 Observational geometry and atmospheric parameters of SHDBAN and XCDH_W

Site	Date	Solar zenith angle / (°)	View zenith angle / (°)	Relative azimuth angle / (°)	Total column water vapor / ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Total column ozone / ($\text{atm}\cdot\text{cm}$)	AOD
SHDBAN	20190813	26.01	22.29	130.25	0.123	2.59	0.133
XCDH_W	20190811	29.07	37.55	36.60	0.112	2.43	0.068

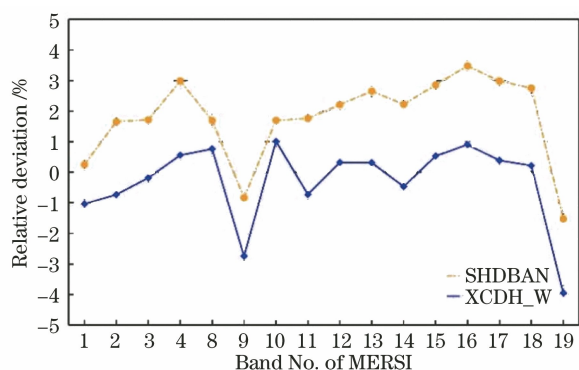


图 7 基于两种不同地表反射率光谱计算的 MERSI 不同通道大气顶层反射率的相对偏差

Fig. 7 Relative deviation of reflectance of top of atmosphere for different MERSI channels based on two different surface reflectance spectra

5 结 论

在中国西北地区选取了 10 个沙漠场,采用手持和机载地物光谱仪两种方式测量地表反射率光谱数据。分析同一个场地不同时间反射率光谱特征的差异和同一场地不同观测尺度下地表反射率的光谱差异。基于沙漠地表反射率特征构建了反射率光谱模型,对模型精度和模型在场地定标中的使用性进行了评估。主要结论如下:

1) 同一场地一天内不同时间的地表反射率光谱形状相似,光谱角小于 5° ,光谱幅度的变化主要受太阳天顶角和大气状况的影响。不同场地的光谱

进而计算二者的相对偏差 $[(\rho_{4\text{Par}}^{\text{TOA}} - \rho_{\text{svc}}^{\text{TOA}}) / \rho_{\text{svc}}^{\text{TOA}} \times 100]$ 。图 7 为基于两种不同地表反射率光谱计算的 MERSI 不同通道大气顶层反射率的相对偏差。可以看出,用模拟光谱代替实测光谱计算得到的大气顶层反射率相对偏差小于 3%。十道班基于模拟光谱计算的大气顶层反射率总体高于基于实测光谱计算的结果。小柴旦湖西除了波段 9 和 19 外,两种结果的相对偏差都在 1% 以内。结果表明,用四参数模型模拟光谱可替代实测光谱正演计算大气顶层反射率,结合遥感器测量的 DN 值可获取定标系数。

形状差异较大,光谱形状主要由地表物理特征决定。地表、UAV 和卫星三种观测尺度下的地表反射率光谱一致性很好,表明沙漠场反射率空间分布均一,可以用不同尺度下测量的反射率光谱构建地表反射率光谱模型。

2) 构建四参数反射率光谱模型,采用最小二乘法对试验实测光谱进行拟合。当波长小于 1000 nm 时,两条光谱曲线的一致性很好,光谱模型准确地模拟了地物的光谱特征。当波长大于 1000 nm 时,光谱差异相对较大。各场地实测光谱与模拟光谱的 RMSE 均在 0.6% 以内, R 均在 0.99 以上。

由于定标试验的数据有限,本研究只是基于卫星过境时的实测地表反射率数据进行建模,并得到了不同沙漠场的通用四参数模型,主要目的是评估反正切四参数模型模拟的反射率的精度。此外,四参数会随着观测几何的变化而变化。在下一步工作中,一方面考虑使用更多的地表实测光谱数据,并在模型中考虑 BRDF 特性。另一方面鉴于构建的模型只需要 4 个参数,可基于高精度的星载高光谱数据反演地表反射率模型四参数,进而可以通过四参数模型来代替同步实测地表反射率进行遥感器的绝对辐射定标,目前这部分工作已经开展并取得了部分成果。

参 考 文 献

- [1] Hu X Q, Sun L, Liu J J, et al. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral

- imager onboard FY-3A [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50 (12): 4915-4928.
- [2] Xiong X X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(1): 69-79.
- [3] Xiong X X, Chiang K F, Wu A S, et al. Multiyear on-orbit calibration and performance of terra MODIS thermal emissive bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1790-1803.
- [4] Barnes R A, Eplee R E, Schmidt G M, et al. Calibration of SeaWiFS. I. Direct techniques [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(36): 6682-6700.
- [5] He X W, Han Q, Feng X H, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared bands of FY-3B MERIS [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (18): 1828001.
何兴伟, 韩琦, 冯小虎, 等. FY-3B 卫星 MERIS 可见光近红外波段定标精度评估 [J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1828001.
- [6] Chen F N, Fan Y Z, Hong J, et al. In-flight radiation calibration of a directional polarimetric camera at visible bands onboard GF-5 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2328001.
陈斐楠, 樊依哲, 洪津, 等. 高分五号多角度偏振探测仪可见光波段在轨辐射定标研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2328001.
- [7] Li X, Zhang L M, Si X L, et al. Accuracy verification of on-board radiometric calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0928001.
李鑫, 张黎明, 司孝龙, 等. 星上辐射定标精度验证方法研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0928001.
- [8] Hu X Q, Liu J J, Sun L, et al. Characterization of CRCS Dunhuang test site and vicarious calibration utilization for Fengyun (FY) series sensors [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(5): 566-582.
- [9] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, et al. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11-37.
- [10] Teillet P M, Slater P N, Ding Y, et al. Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 31(2): 105-120.
- [11] Czaplá-Myers J S, Thome K J, Leisso N P. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley, Nevada [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(5): 474-487. [LinkOut]
- [12] Cosnefroy H, Leroy M, Briottet X. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(1): 101-114.
- [13] Teillet P M, Chander G. Terrestrial reference standard sites for postlaunch sensor calibration [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(5): 437-450.
- [14] Chun H W, Sohn B J. Climatological assessment of desert targets over East Asia: Australian region for the solar channel calibration of geostationary satellites [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 50(2): 239-246.
- [15] Padula F, Schott J, Cao C Y. Spatial, spectral, and radiometric characterization of Libyan and Sonoran desert calibration sites in support of GOES-R vicarious calibration [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=2A46C7198C448014B50E898E7D4DEE3E?doi=10.1.1.172.7751&rep=rep1&type=pdf>.
- [16] Bruegge C J, Coburn C, Elmes A, et al. Bi-directional reflectance factor determination of the railroad valley playa [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (22): 2601.
- [17] Angal A, Chander G, Xiong X X, et al. Characterization of the Sonoran desert as a radiometric calibration target for Earth observing sensors [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5 (1): 059502.
- [18] Wu A, Zhong Q. A method for determining the sensor degradation rates of NOAA AVHRR channels 1 and 2 [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(1): 118-122.
- [19] Kizu S, Kawamura H. Degradation of the VISSR visible sensor on GMS-3 during June 1987-December 1988 [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10(4): 509-517.
- [20] Tan K, Wang X, Niu C, et al. Vicarious calibration for the AHSI instrument of Gaofen-5 with reference to the CRCS Dunhuang test site [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(4): 3409-3419.
- [21] Hu X Q, Wang L, Wang J W, et al. Preliminary selection and characterization of pseudo-invariant calibration sites in Northwest China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2517.
- [22] Pang W W, Zheng X B, Lu J H, et al. Reflectance characteristics of Dunhuang radiometric calibration

- test site [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(6): 472-481.
- 庞伟伟, 郑小兵, 陆俊桦, 等. 敦煌辐射校正场地表反射率稳定性分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(6): 472-481.
- [23] Zhang Y X, Li X, Zhang M, et al. On-orbit radiometric calibration for thermal infrared band of FY3D/MERSI-II satellite remote sensor based on Qinghai lake radiation calibration test-site[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(5): 0528002.
- 张允祥, 李新, 张孟, 等. 基于青海湖辐射校正场的 FY3D/MERSI-II 卫星遥感热红外波段在轨辐射定标[J]. *光子学报*, 2020, 49(5): 0528002.
- [24] Hu X Q, Sun L, Liu J J, et al. Calibration for the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 71-83.
- 胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 风云三号 A 星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 71-83.
- [25] Zhao C Y, Zhang Y N, Wei W, et al. Absolute radiometric calibration method based on surface hyperspectral BRDF model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5): 0528001.
- 赵春艳, 张艳娜, 韦玮, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的绝对辐射定标方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(5): 0528001.
- [26] He L L. Selection, evaluation and radiometric calibration application of pseudo-invariant calibration sites (PICS) in Northwest China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2020.
- 何灵莉. 我国西北准不变定标场(PICS)的选取评价和辐射定标应用[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2020.
- [27] Miesch C, Cabot F, Briottet X, et al. Assimilation method to derive spectral ground reflectance of desert sites from satellite datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2/3): 359-370.