

doi:10.3788/gzxb20184706.0612004

# 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析

余谭其<sup>1,2</sup>, 韦玮<sup>1,2</sup>, 张艳娜<sup>1</sup>, 张运杰<sup>1</sup>, 李新<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>, 孙凌<sup>3,4</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230031)

(3 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081)

(4 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, 北京 100081)

**摘 要:**风云四号 A 星在轨替代定标试验于 2017 年 4 月下旬在敦煌辐射校正场正式开展, 为满足地表反射率在传感器视角方向上的校正需求, 利用便携式定点测量装置对敦煌戈壁地表进行了方向特性测量. 定性分析了敦煌场地春季的方向特性, 并基于 RossThick-LiSparseR 核驱动模型反演了相应的双向反射分布函数模型参数, 构建了场地方向特性定量描述模型. 对模型的计算值与实测数据进行线性回归分析, 得到 2017 年 4 月 26 日、27 日和 28 日的修正决定系数分别在 0.75、0.83 和 0.85 左右, 验证了该模型对实测数据具有良好的拟合优度. 利用模型计算太阳方位面上的各向异性因子并与中分辨率成像光谱仪双向反射分布函数模型参数产品的历史数据进行对比发现, 当观测天顶角小于  $40^\circ$  时, 二者相对偏差在波段 2 和波段 4 均小于 1.56%, 波段 5 小于 3.12%. 这说明构建的模型能较好地描述敦煌场地方向特性, 验证了试验数据的可靠性.

**关键词:** 遥感; 场地定标; 双向反射分布函数; 双向反射分布函数模型; 春季敦煌; 方向反射比; MODIS

**中图分类号:** TP79; TP722.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)06-0612004-10

## Analysis of the BRDF Characteristics of Dunhuang Radiometric Calibration Site in the Spring

YU Tan-qi<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan-na<sup>1</sup>, ZHANG Yun-jie<sup>1</sup>,  
LI Xin<sup>1</sup>, ZHEN Xiao-bing<sup>1</sup>, SUN Ling<sup>3,4</sup>

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

(3 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

(4 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** An on-orbit vicarious calibration experiment for FY-4A was formally performed at Dunhuang Radiometric Calibration Site in late April, 2017. In order to meet the needs of the directional corrections in the sensor viewing angle of surface reflectances, the Dunhuang Gobi surface directional reflectances were measured using a portable measurement instrument. The spring directional reflection characteristics of Dunhuang site were qualitatively analyzed and the parameters of bidirectional reflectance distribution function model were inverted based on the RossThick-LiSparseR kernel-driven model. The linear regression analysis was performed for the calculated data and the measured data, the adjusted R-Square

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金 (No. 61505222), 民用航天技术预研项目 (No. D040401), 中国科学院联合基金 (No. 6141A01011602) 和中国科学院创新基金项目 (No. CXJJ-15S103) 资助

**第一作者:** 余谭其 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地表方向特性测量与分析. Email: yiedzone@mail.ustc.edu.cn

**导师 (通讯作者):** 张运杰 (1965-), 女, 研究员, 硕士, 主要研究方向为光学遥感领域光电探测. Email: zhangyj@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2017-11-24; **录用日期:** 2018-03-16

<http://www.photon.ac.cn>

of April 26th, 27th and 28th, 2017 are 0.75, 0.83 and 0.85, and the present model had proven to provide a good fit to measured data. The anisotropy factors in the solar principal plane were obtained by utilizing model and compared with historical data of moderate-resolution imaging spectroradiometer BRDF/Albedo model parameters product. The relative deviation of band 2 and band 4 were below 1.56% and the band 5 was below 3.12% when the view zenith angle was less than 40 degrees. The results demonstrate that the constructed model can pretty describe the directional reflection characteristics of Dunhuang site, and verify the reliability of measured data.

**Key words:** Remote sensing; Field calibration; BRDF; BRDF model; Dunhuang in spring; Directional reflectance; MODIS

**OCIS Codes:** 290.1483; 240.6490; 120.5630; 120.4640; 010.0280

## 0 引言

卫星遥感在轨替代定标试验中,需要对卫星观测方向的反射率进行准确测量,而在实际外场试验中是难以控制观测角度的,一般通过测量地表垂直反射率,并利用辐射校正场双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型计算卫星过境时刻的方向校正因子<sup>[1]</sup>,对垂直观测数据进行方向性校正以获取地表方向反射率,分析辐射校正场方向反射特性,并建立有效定量描述模型对提高方向反射率测量和定标精度具有重要意义<sup>[2]</sup>.

20世纪90年代,安徽光机所何积泰等利用非定点全自动 BRDF 测量系统对敦煌场进行了测量<sup>[3]</sup>,初步对场地进行了方向特性评价,为中国遥感卫星辐射校正场项目做了前期的准备工作.自2002年敦煌辐射校正场正式投入使用以来,国家卫星气象中心每年都会定期在敦煌进行场地替代定标试验,但在前期的试验中并未系统地对场地进行 BRDF 测量.2007年7月安徽光机所李新等研制出高精度自动化 BRDF 定点测量系统并应用该系统进行了敦煌辐射校正场的测量,获取了建场以来最为全面的方向特性测量数据<sup>[4-5]</sup>.与此同时随着 BRDF 模型研究的发展,半经验的核驱动模型由于其简洁、快速以及具有一定的物理意义<sup>[6]</sup>,被应用到敦煌场 BRDF 实测数据的处理中.2013年8月国家卫星气象中心李元等利用野外便携式方向放射比非定点测量系统<sup>[7]</sup>,在敦煌场同步试验中进行了 BRDF 试验并反演了敦煌场地夏秋季的 BRDF 模型参数<sup>[8]</sup>,并用于目前场地定标试验中地表反射率的方向修正.从测量方式上来看,相对于不定点测量而言,定点测量过程更符合 BRDF 的定义,利用定点实测数据进行模型参数的反演更具合理性.另外由于天气、湿度和风沙等因素的影响,敦煌场在不同季节其地表垂直反射率及方向反射特性是有所差异的<sup>[9-10]</sup>,对于在春季进行的场地定标以及全年场地自动化观测定标来说<sup>[11]</sup>,仅仅使用夏秋季的 BRDF 模型来代替春季是不合理的.

本文利用便携式定点测量装置对敦煌场进行方向反射测量,定性分析了敦煌场地的方向反射特性.基于 RossThick-LiSparseR 核驱动模型反演了 BRDF 参数,构建了敦煌辐射校正场的春季 BRDF 模型,并分析了模型对实测数据的拟合优度.将模型计算的各向异性因子(Anisotropy Factor, ANIF)结果与中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)双向反射分布函数模型参数产品(BRDF/Albedo Model Parameters product, MCD43C1)的历史数据进行了对比,对比结果表明了二者具有较好的一致性,模型能真实定量地反映敦煌场地春季方向反射特性,为风云四号 A 星的春季定标工作提供了可靠的 BRDF 校正数据支持.另外,将 MODIS 春季与夏秋季的 ANIF 进行比较,验证了场地在不同季节的方向反射特性存在着差异,表明了构建不同季节 BRDF 模型的必要性.

## 1 敦煌场 BRDF 测量及数据处理

### 1.1 场地试验

敦煌辐射校正场位于甘肃省敦煌市的西部,距敦煌市约 17 km,属于党河冲积扇.场内地物类型单一稳定,地表层基本无植被覆盖,由多种岩石碎屑组成的砾石、细砂及少量黏土组成<sup>[2]</sup>.相比于国内外其他辐射校正场,敦煌场具有地势平坦、地表均匀、方向特性较好、气候干燥、交通方便等优势.

BRDF 手动测量装置(图 1)由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制,图 1(a)为测量机械结构.天顶弧通过轨道滑块与方位圆连接,可手动转动滑块保证天顶弧在方位圆上  $0\sim 360^\circ$  范围内自由转动.天顶测量滑块用于固定测量枪头,并可在天顶弧上滑动和固定,其沿轨道的滑动范围为天顶  $-75^\circ\sim 75^\circ$ .方位圆、天顶

弧上有刻度线与示值,最小定位刻度为  $1^\circ$ 。试验采用 ASD 公司生产的野外光谱仪(ASD FieldSpec3 Spectra Radiometer, ASD FR)对目标地表进行光谱数据采集,该光谱仪的观测波段为  $350\sim 2\,500\text{ nm}$ 。试验中所使用的标准参考板由安徽光机所遥感中心制造,其方向半球反射比和反射比因子数据由实验室定标获得。其中反射比因子为在指定方向上的反射通量与该方向上理想朗伯体反射通量之比。

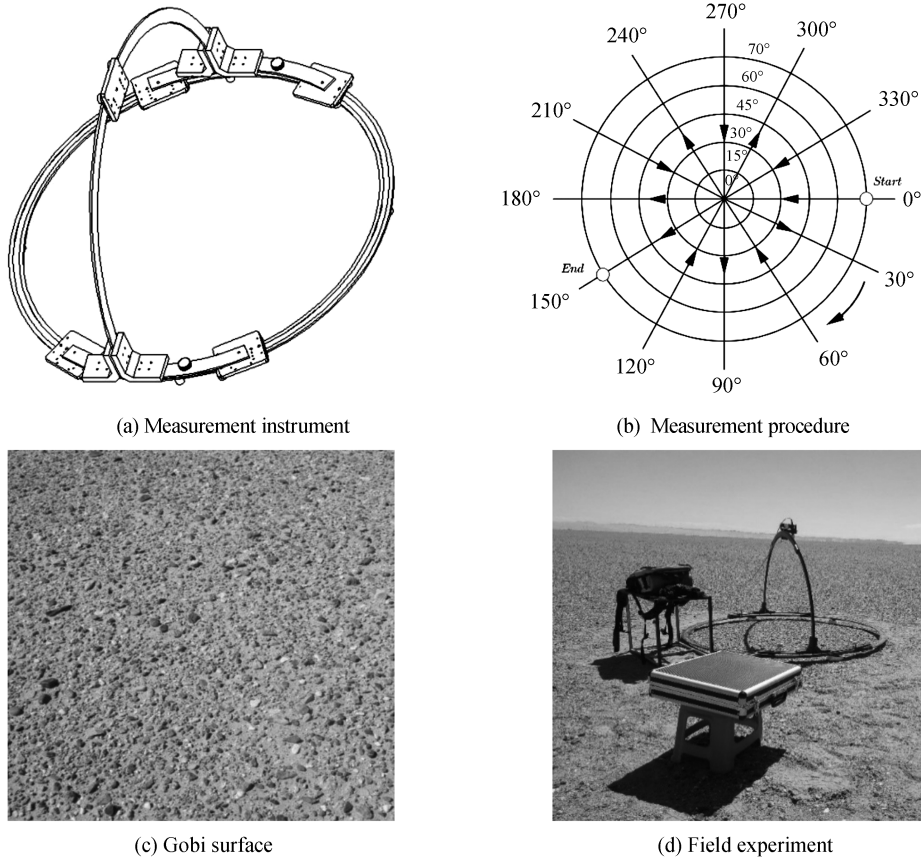


图 1 BRDF 测量  
Fig.1 BRDF measurement

为保证采样数据的多样性,太阳天顶角每间隔  $10^\circ$  进行一轮 BRDF 测量。对于每一轮次试验,观测方位角的范围为  $0\sim 360^\circ$ ,间隔为  $30^\circ$ <sup>[12]</sup>,共 6 个方位面。观测天顶角范围为  $0\sim 70^\circ$ ,每个方位面共 11 个测量位置,其中  $0\sim 60^\circ$  间隔  $15^\circ$ ,有 9 个测量位置,另外 2 个测量位置为观测天顶角  $70^\circ$ 。因此,在整个半球空间内,需要在 66 个测量位置对目标地表进行光谱采样<sup>[13]</sup>,见图 1(b)。在每一轮次 BRDF 测量试验的开始前和结束后,需要对标准板各进行 2 次垂直采样。

BRDF 测量结果包括方向反射比(Bidirectional Reflectance Factor, BRF)和各项异性因子,式(1)为对应的目标方向反射特性测量方程,是 BRDF 测量不确定度分析的主要依据。可以看到 BRDF 测量不确定度主要受标准参考板的反射测量不确定度、探测器的非稳定性、探测器的非线性及测量装置的定位误差等的影响。基于这些因素,当结果为 BRF 时,合成不确定度为  $2.03\%$ ,当结果为 ANIF 时,由于测量过程中并未使用参考板,因此测量结果不受其影响,合成不确定度为  $0.93\%$ ,见表 1。

2017 年 4 月 20~30 日,对敦煌辐射校正场共进行了 5 天次的有效实地测量,获取了大量试验数据。试验中,选择平整均匀、未受到破坏的场地,见图 1(c),组装搭建好测量架,见图 1(d)。人工对场地进行数据采集、数据存储和数据处理。

表 1 BRDF 测量不确定度  
Table 1 Uncertainty of BRDF measurement

Sources of uncertainty	Uncertainty/%	
	Bidirectional reflectance factor	Anisotropy factor
Reflectance of diffuser panel	1.8	0.00
Instability of ASD FR	0.34	0.34
Nonlinearity of ASD FR	0.84	0.84
View zenith angle	0.19	0.19
View azimuth angle	0.08	0.08
Combined uncertainty	2.03	0.93

## 1.2 数据处理

### 1.2.1 方向反射比计算

ASD FR 光谱仪采用 DN 值测量模式,按照“标准板-地表-标准板”的方式测量地表方向反射比.方向反射比  $\rho_t(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$  由式(1)得到<sup>[14]</sup>,即

$$\rho_t(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = \frac{V_t(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)}{V_p(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)} \alpha(\lambda, \theta) \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为波长值,  $\theta$  为太阳天顶角,  $\vartheta$  为观测天顶角,  $\varphi$  为相对方位角;  $V_t(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$  是目标地表测量的 DN 值光谱曲线;  $V_p(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$  为标准板测量的 DN 值光谱曲线(多次标准板测量 DN 值取平均);  $\alpha(\lambda, \theta)$  为在太阳天顶角度为  $\theta$  时对应的标准板反射比因子.

### 1.2.2 BRDF 模型拟合

采用基于 RossThick-LiSparseR 核驱动模型对敦煌场试验结果进行拟合,该模型属于半经验核驱动模型,半经验核驱动模型的构造形式可表示为<sup>[15]</sup>

$$R(\theta, \vartheta, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta, \vartheta, \varphi) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta, \vartheta, \varphi) \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长值,  $\theta$  为太阳天顶角,  $\vartheta$  为观测天顶角,  $\varphi$  表示相对方位角;  $k_{\text{vol}}$  为体散射核,  $k_{\text{geo}}$  为几何光学核;  $f_{\text{iso}}$ ,  $f_{\text{vol}}$  和  $f_{\text{geo}}$  是各项核系数,分别表示各向同性散射,体散射和几何光学散射这三部分所占的权重;  $R(\theta, \vartheta, \varphi, \lambda)$  为方向反射比.

半经验核驱动模型是利用具有一定物理意义核函数的加权来拟合地表 BRDF 形状,具有数据拟合速度快、拟合能力强等优点.本文所采用的核驱动模型与目前业务化运行的 MODIS BRDF 算法模型<sup>[6]</sup>一致,其中体散射核为 RossThick 核,几何光学散射核为 LiSparseR 核. RossThick 核是基于 Ross 的辐射传输理论<sup>[16]</sup>推导而来<sup>[15]</sup>. LiSparseR 核为 LiSparse 核的互易形式<sup>[17]</sup>, LiSparse 核是根据 Li 和 Strahler 的几何光学模型<sup>[18]</sup>推导得到的<sup>[19]</sup>.

模型利用最小二乘法算法,反演出拟合观测数据最优的各项核系数.即给定观测反射比  $\rho(\lambda)$  和对应的角度信息  $(\theta, \vartheta, \varphi)$ ,最小化均方误差  $e^2(\lambda)$ <sup>[20]</sup> 为

$$e^2(\lambda) = \frac{1}{d} \sum_l \frac{[\rho(\theta_l, \vartheta_l, \varphi_l, \lambda) - R(\theta_l, \vartheta_l, \varphi_l, \lambda)]^2}{\omega_l(\lambda)} \quad (3)$$

式中,  $d$  为自由度,即观测样本个数减去核系数个数;  $\omega_l$  为给定相应的第  $l$  个观测值的权重(默认  $\omega_l = 1$ );  $\rho(\theta_l, \vartheta_l, \varphi_l, \lambda)$  为反射比观测值;  $R(\theta_l, \vartheta_l, \varphi_l, \lambda)$  为模型拟合值;  $e^2(\lambda)$  为拟合均方误差,反应了模型对于观测值的拟合效果,值越小,说明拟合效果越好.反演出相应的核系数之后,根据 RossThick-LiSparseR 模型可以求出任意太阳入射角和观测角条件下的方向反射比.

## 2 结果分析与验证

### 2.1 敦煌场地方向反射特性分析

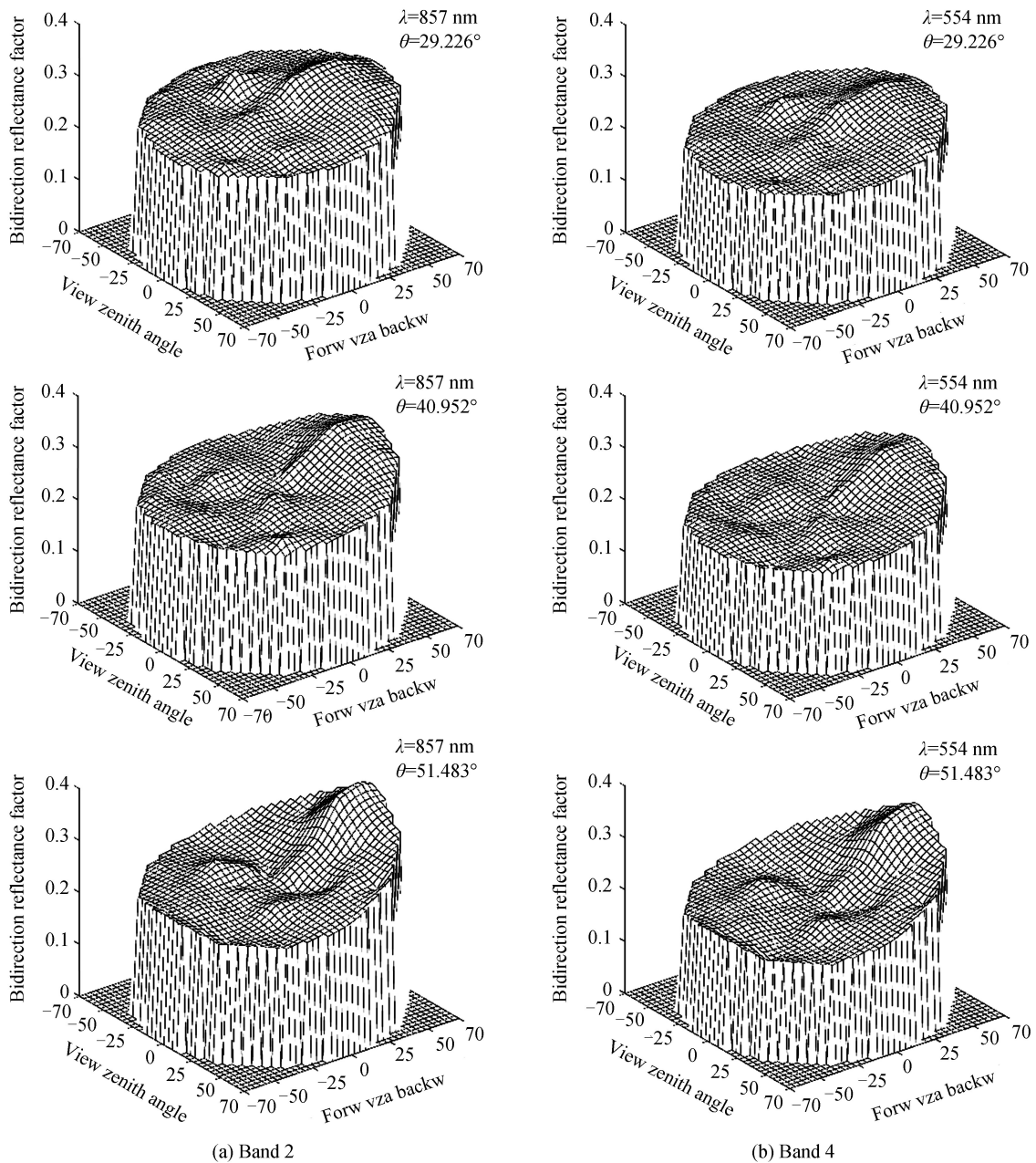
选用 2017 年 4 月 26 日下午部分测量数据,对其进行方向反射比计算处理后,选取 857 nm、554 nm、1 242 nm 三个波长(分别对应 MODIS 传感器 2、4、5 波段的中心波长)和三个太阳天顶角(分别在太阳天顶角 30°、40°和 50°附近)的实测数据,给出相应的方向反射比三维分布曲面图,如图 2 所示.图 2(a)、(b)、(c)分别是波长 857 nm、554 nm 和 1 242 nm 在不同太阳天顶角下反射比三维分布趋势曲面图.  $x$  和  $y$  轴表示观测

天顶角,其中  $x$  轴的 forw, backw 为前、后向标识,  $z$  轴表示方向反射比的大小.分析表明:

1) 反射比三维分布曲面图中,平面  $y=0$  表示当前太阳所在的方位面.结合图 2 各个曲面图的反射比分布情况可以看到,在不同波长和不同太阳天顶角下,场地的方向反射比基本是关于太阳方位面对称分布,对称平面两侧起伏较小.该特性反映了敦煌场地势平坦、地表类型单一、均匀性较好的特点.

2) 图 2 各个曲面中  $x>0$  表示场地的后向反射区域(靠近太阳一侧),  $x<0$  表示场地的前向反射区域(远离太阳一侧).可以看到在不同波长和不同太阳天顶角下,场地的后向反射比要大于前向,这一特性在太阳方位面上表现得尤为明显.在同一波长下,如图 2(a),随着太阳天顶角的增大,前后向反射分布差异会越来越大.

3) 图 2 中各个曲面均存在极大值点,即场地存在“热点”,其位置分布在太阳方位面( $Y=0$ )的后向位置.在同一波长下,随着太阳天顶角的变化而变化.从图 2(a)中可以看到,当太阳天顶角在  $30^\circ$ 、 $40^\circ$  和  $50^\circ$  附近时,热点位置分别在后向观测天顶角  $30^\circ$  ( $x=30, y=0$ )、 $40^\circ$  ( $x=40, y=0$ ) 和  $50^\circ$  ( $x=50, y=0$ ) 附近.



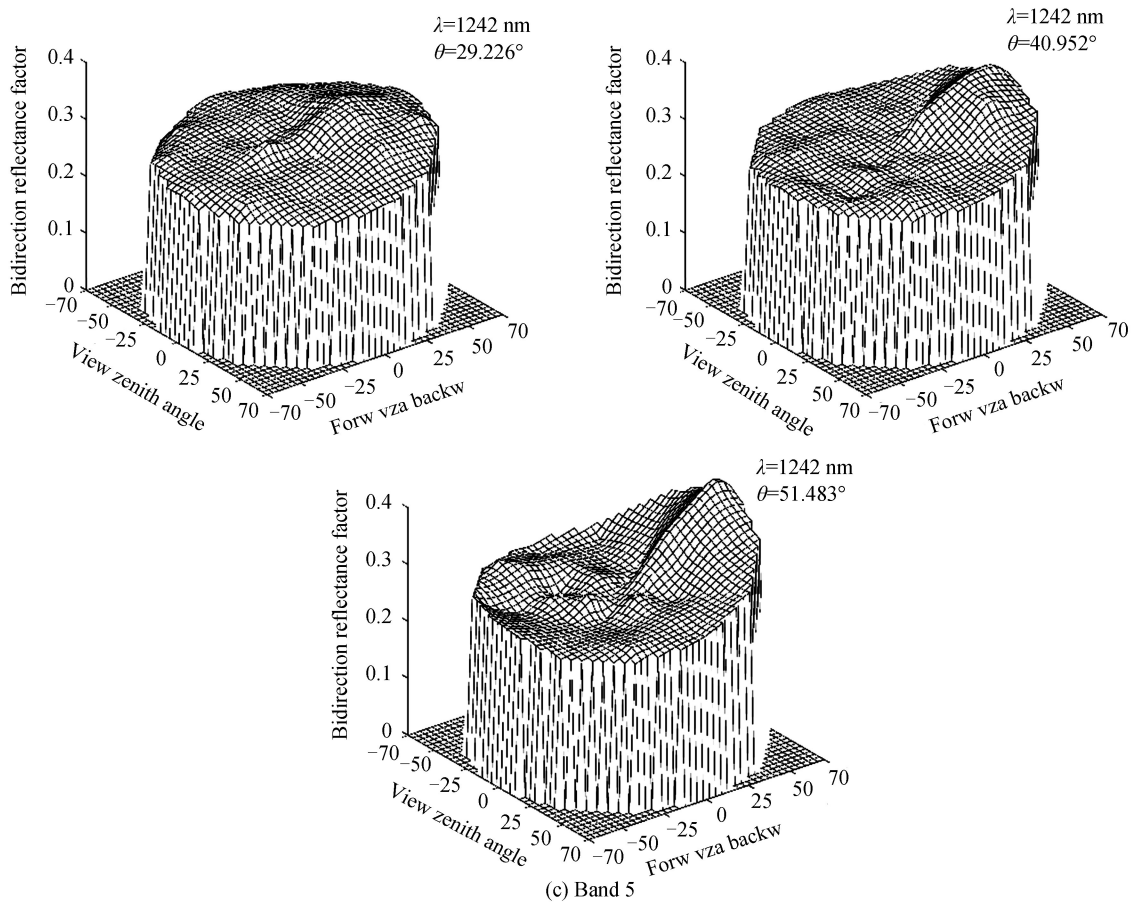


图2 2017年敦煌场方向反射比分布

Fig.2 Bidirectional reflectance factor distribution of Dunhuang test site in 2017

## 2.2 模型拟合系数与结果对比

### 2.2.1 模型核系数

选用4月26日、27日和28日的BRDF观测数据,对数据进行处理和筛选之后,利用RossThick-LiSparseR模型对每天的观测数据进行反演,得到各个波长对应的模型核系数.部分波长的反演参数结果如表2所示(MODIS传感器2、4、5波段的中心波长).

表2 RossThick-LiSparseR模型反演核系数结果

Table 2 Statistics of the parameters of RossThick-LiSparseR model inversion

BAND	Central	2017.04.26			2017.04.27			2017.04.28		
		$f_{iso}$	$f_{vol}$	$f_{geo}$	$f_{iso}$	$f_{vol}$	$f_{geo}$	$f_{iso}$	$f_{vol}$	$f_{geo}$
2	857 nm	0.273 78	0.070 717	0.025 371	0.279 68	0.077 03	0.023 786	0.279 96	0.072 787	0.023 326
4	554 nm	0.227 77	0.076 81	0.021 075	0.235 51	0.084 931	0.020 489	0.231 65	0.078 609	0.019 402
5	1 242 nm	0.302 25	0.073 144	0.024 271	0.302 98	0.071 181	0.022 901	0.309 29	0.082 428	0.020 64

为验证BRDF模型对原始数据的拟合优度,将表中每个波段核系数代入式(2)中,计算在不同太阳天顶角和观测方位角下的方向反射比,与原始观测数据进行线性回归,求出修正决定系数.图3为26、27和28日的BRDF模型计算值与实际测量值的线性回归图,其中横坐标为模型计算的方向反射比,纵坐标为敦煌场地实测方向反射比.

从图3中可以看到,每天各波段修正决定系数基本大于0.7,表明模型具有良好的拟合优度,能较好地拟合每天观测数据.其中26日的修正决定系数在0.75左右,相比与27日和28日要低,模型的拟合优度较次.另外,28日波段5的模型计算值与原始观测值出现了较大的差异(图3c),其修正决定系数为0.6393,而其他波段的决定系数均在0.85左右.这是由于ASD光谱仪预热不足导致探测器工作不稳定,特别是在两段探测器的拼接处<sup>[21]</sup>(1 000 nm和1 840 nm左右),而5波段正处于该波长位置附近,从而导致其部分测量数据存

在较大误差。

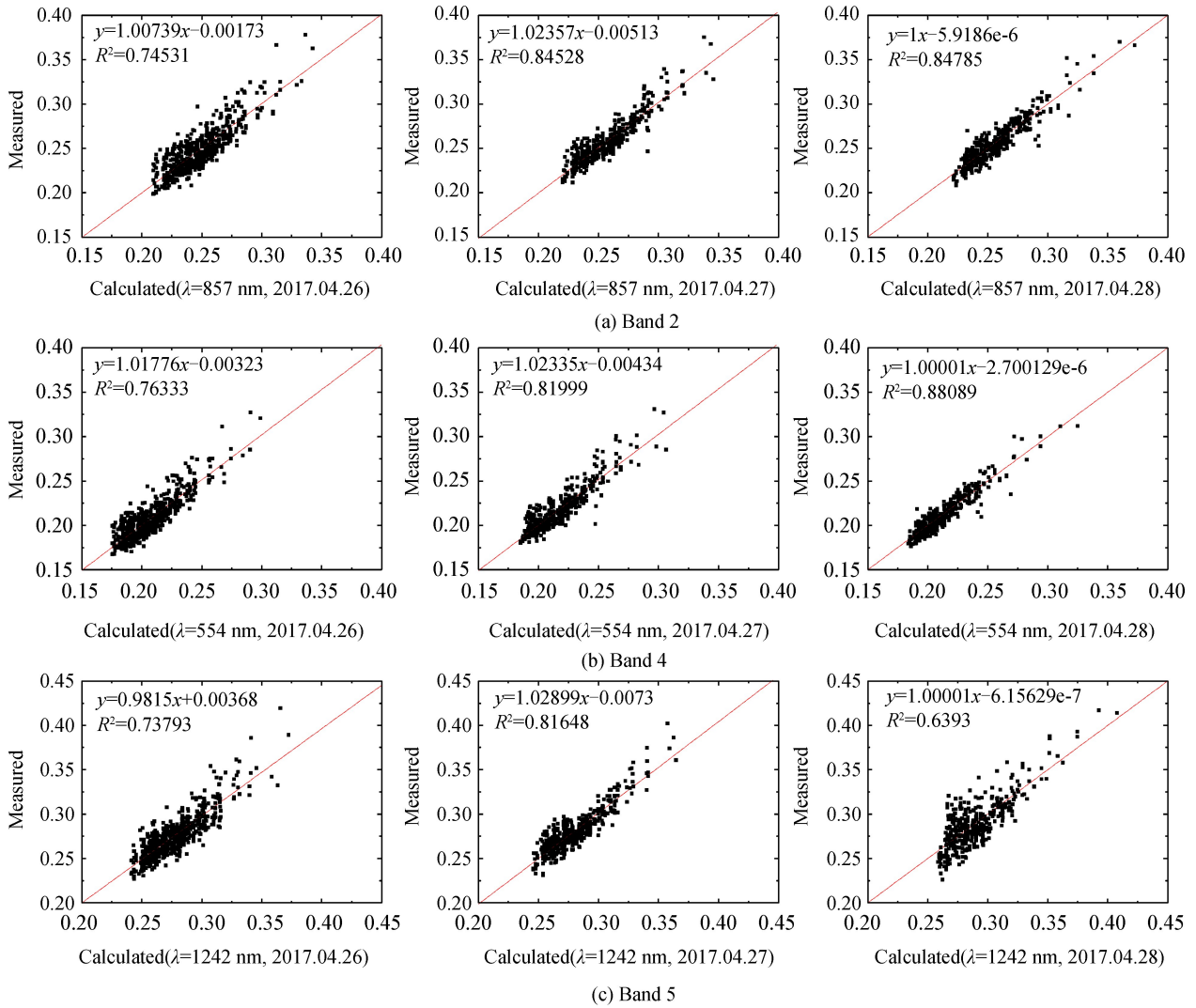


图3 修正决定系数  
Fig.3 Adjusted R square

### 2.2.2 与 MODIS 产品历史数据对比

为了验证春季 BRDF 测量与模型反演的准确性,使用 MODIS 的 BRDF 产品进行对比分析。MCD43C1 产品提供了 MODIS 1-7 波段及可见、近红外和短波波段 BRDF 模型参数,用户可以根据这些参数,利用 RossThick-LiSparseR 模型计算任意太阳及观测角的反射率。选取 2010~2016 年 C5 版本 MCD43C1 产品共 7 年的产品数据,分别提取敦煌场(40°09'N,94°38'E)春季(4月30日)和夏秋季(8月29日)的 BRDF 参数,利用模型计算出不同太阳天顶角下,太阳方位面上各个位置的方向反射比,然后以天底反射作为参考值,归一化各个方向的反射,得到各向异性因子 ANIF,如式(4)<sup>[4]</sup>。

$$\alpha_{ANIF}(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi) = \frac{\rho_{RossLi}(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)}{\rho_{RossLi}(\lambda, \theta, 0, 0)} \quad (4)$$

式中,  $\rho_{RossLi}(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$  为模型计算的各个方向反射比,  $\rho_{RossLi}(\lambda, \theta, 0, 0)$  为模型计算的天底方向反射比。  $\alpha_{ANIF}(\lambda, \theta, \vartheta, \varphi)$  为各向异性因子,结合地表垂直实测反射率,进行方向校正计算即可得到场地的方向反射率。

利用 MCD43C1 产品提供的 BRDF 参数计算出每年的 ANIF,并对总共 7 年的计算结果进行取平均,得到敦煌场整体较为稳定的春季和夏秋季 ANIF 变化曲线。将 2017 年 4 月 27 日 BRDF 参数计算得到的 ANIF 曲线与 MODIS 春季曲线进行对比。在不同波段和太阳天顶角下,图 4 为两者在太阳方位面上的 ANIF 对比

曲线图,表 3 列出了两者在太阳方位面上各个位置 ANIF 计算结果的相对偏差.同时,为验证敦煌场地在不同季节其方向特性存在差异,将 MODIS 夏秋季 ANIF 计算结果与 MODIS 春季结果进行比较,表 4 列出了二者在太阳方位面上各个位置 ANIF 的相对偏差.

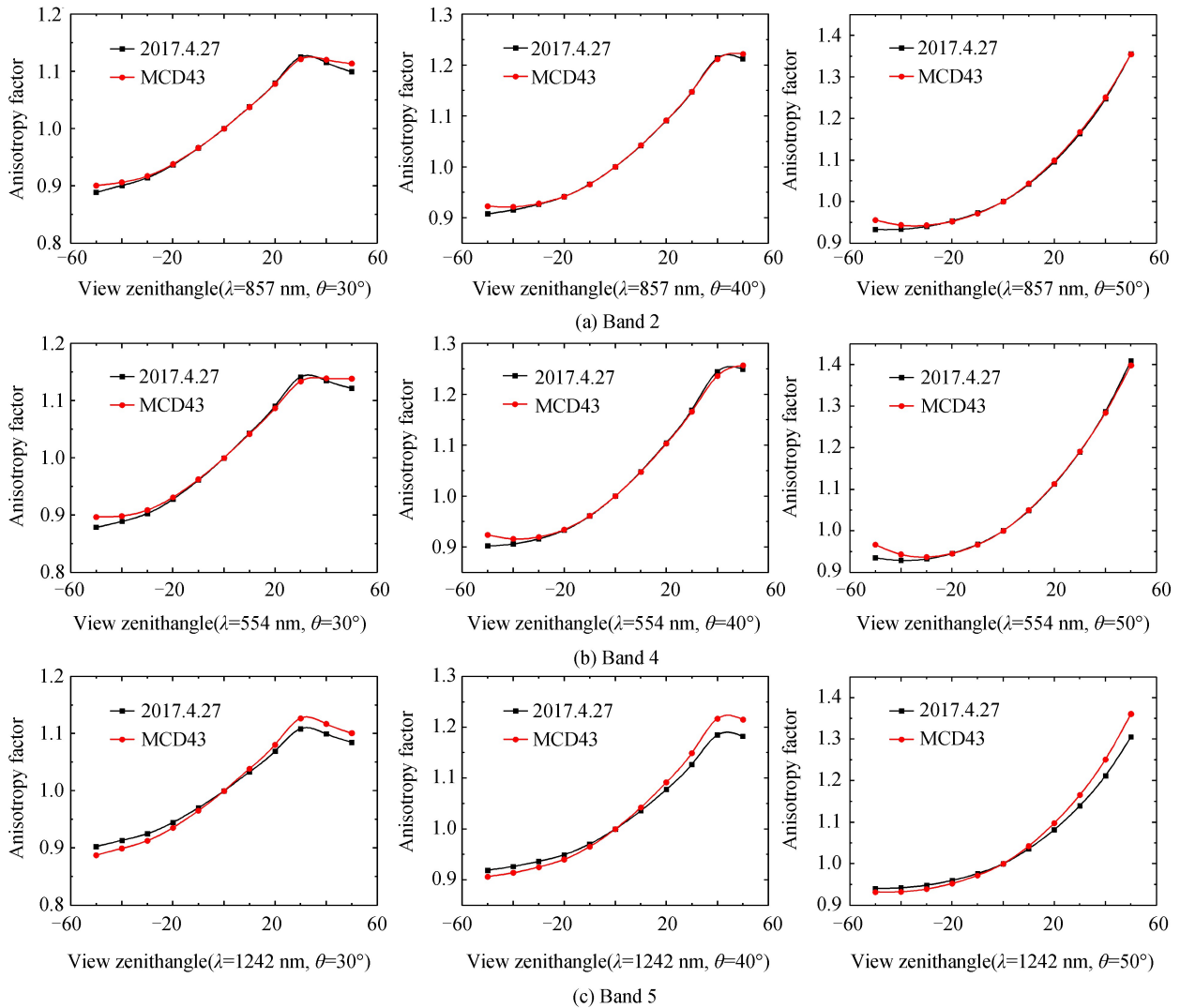


图 4 太阳方位面 ANIF 曲线对比

Fig.4 Comparison of the ANIF curves in solar plane

表 3 2017 年试验与 MODIS 春季 ANIF 计算结果相对偏差

Table 3 Percent difference in ANIF between experiment in 2017 and MODIS historical data in spring

Azi	Zen	Band 2 relative deviation/%			Band 4 relative deviation/%			Band 5 relative deviation/%		
		30°	40°	50°	30°	40°	50°	30°	40°	50°
180	50	-1.3	-1.62	-2.36	-2.03	-2.4	-3.26	1.71	1.4	0.92
180	40	-0.60	-0.65	-1.04	-1.07	-1.1	-1.56	1.57	1.35	1.03
180	30	-0.31	-0.15	-0.26	-0.66	-0.41	-0.53	1.36	1.2	0.98
180	20	-0.14	0	0.10	-0.36	-0.18	-0.01	0.99	0.95	0.78
180	10	-0.04	0.02	0.15	-0.15	-0.07	0.11	0.52	0.54	0.46
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	10	0.04	-0.05	-0.13	0.14	0.04	-0.06	-0.54	-0.61	-0.64
0	20	0.13	-0.08	-0.27	0.35	0.11	-0.10	-1.07	-1.26	-1.39
0	30	0.33	-0.03	-0.34	0.70	0.30	-0.05	-1.6	-1.95	-2.22
0	40	-0.44	0.18	-0.28	-0.32	0.69	0.2	-1.56	-2.65	-3.12
0	50	-1.3	-0.81	0.04	-1.46	-0.58	0.79	-1.46	-2.73	-4.09



从图 4 可以看出在太阳方位面上两者的 ANIF 曲线非常接近,整体变化趋势一致.结合表 3 可以看到,当观测天顶角小于  $40^\circ$  时,在不同太阳天顶角下,波段 2 和波段 4 相对偏差均小于  $1.56\%$ ,波段 5 相对偏差基本保证在  $3\%$  以内.这表明模型能较好地定量描述春季敦煌场地的方向特性.

由表 4 可以看出敦煌场地春季和夏秋季 ANIF 存在差异,特别是在后向“热点”位置差异明显.当观测天顶角大于  $20^\circ$  时,两者在不同太阳天顶角下各波段 ANIF 的相对偏差基本在  $2\%$  以上,随着观测天顶角和太阳天顶角的增大,其相对偏差最大能达到  $7.42\%$ .这表明了在不同季节,敦煌场地的方向特性是有所差异的,因此在春季进行场地定标的过程中,为提高定标精度,应当利用春季 BRDF 模型对地表反射率进行方向性校正.

表 4 MODIS 春季与夏秋季的 ANIF 计算结果相对偏差

Table 4 Percent difference in ANIF between spring and the transaction of summer and autumn in MODIS

Azi	Zen	Band 2 relative deviation/%			Band 4 relative deviation/%			Band 5 relative deviation/%		
		$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$
180	50	-3.22	-2.72	-2.02	-4.35	-4.07	-3.86	-3.42	-3.05	-2.61
180	40	-2.83	-2.45	-1.96	-3.44	-3.10	-2.87	-2.87	-2.55	-2.21
180	30	-2.41	-2.10	-1.73	-2.79	-2.36	-2.07	-2.40	-2.09	-1.78
180	20	-1.74	-1.64	-1.32	-1.94	-1.76	-1.36	-1.71	-1.60	-1.29
180	10	-0.90	-0.93	-0.76	-0.98	-0.98	-0.72	-0.88	-0.90	-0.72
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	10	0.94	1.05	1.07	1.01	1.07	1.05	0.91	1.00	1.04
0	20	1.89	2.17	2.34	2.06	2.22	2.29	1.85	2.10	2.26
0	30	2.86	3.36	3.75	3.21	3.49	3.72	2.82	3.28	3.65
0	40	2.60	4.64	5.31	2.37	4.96	5.38	2.43	4.55	5.21
0	50	2.20	4.51	7.09	1.33	4.10	7.42	1.89	4.26	7.00

### 3 结论

使用便携式手动测量装置于 2017 年 4 月 20~30 日对敦煌辐射校正场进行了 BRDF 测量试验,获取了大量的试验数据.利用场地实测数据对春季敦煌场地进行了方向性评价,并基于 RossThick-LiSparseR 核驱动模型反演了对应波长的核系数,构建了春季敦煌场方向反射特性的定量描述模型.利用 2010 年~2016 年间 MODIS 双向反射分布函数产品的历史数据与模型计算值进行了比较,二者获取的 ANIF 结果在太阳方位面上曲线变化趋势非常一致,其中在观测天顶角小于  $40^\circ$  时,波段 2 和波段 4 相对偏差均小于  $1.56\%$ ,波段 5 基本小于  $3\%$ .由此可见构建的模型能够真实定量地描述敦煌场春季 BRDF 特性,验证了试验数据的可靠性.同时通过比较 MODIS 春季和夏秋季在太阳方位面上 ANIF 计算结果,得到在不同季节其相对偏差最大能达到  $7.42\%$ ,表明敦煌场地的方向特性在不同季节存在着差异,应当建立不同季节的 BRDF 模型,以满足在不同季节进行场地定标的反射率方向校正需求.该研究工作为风云四号 A 星在轨场地定标提供了可靠的 BRDF 校正,丰富了敦煌辐射校正场多季节 BRDF 模型的研究数据,对于遥感器的多季节场地定标工作具有实际应用的价值与意义.后期,可利用野外无人值守的自动化观测设备对场地的 BRDF 特性进行连续观测,获取多季节 BRDF 实测数据,进一步研究敦煌场方向特性的季节性变化规律.

#### 参考文献

- [1] LI Yuan, RONG Zhi-guo, ZHENG Zhao-jun, et al. Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **17**(12): 2966-2974.  
李元,戎志国,郑照军,等. FY-3A 扫描辐射计的可见近红外通道在轨场地定标[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(12): 2966-2974.
- [2] LI Xiao-ying, GU Xing-fa, YU Tao, et al. Enhanced radiometric calibration coefficients for CCD camera by considering BRDF of calibration sites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 636-643.  
李小英,顾行发,余涛,等. 考虑地物 BRDF 特性改进后的 CBERS-02 卫星 CCD 相机的辐射定标系数[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 636-643.
- [3] HE Ji-tai, LU Yi-huai. The measurement and evaluation of bidirectional reflectance characteristics of Dunhuang radiative calibration site[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(04): 246-251.  
何积泰,陆亦怀. 敦煌辐射校正场方向反射特性测量与评价[J]. *遥感学报*, 1997, **1**(04): 246-251.

- [4] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, XUN Li-na, *et al.* Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 66-70.  
李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. 光电工程, 2008, **35**(1): 66-70.
- [5] LI-Xin, ZHENG Xiao-bing, XUN Li-na, *et al.* Design of automated field hyperspectral BRDF measurement system[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(2): 262-264.  
李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 室外高光谱 BRDF 自动测量系统的设计[J]. 光学技术, 2008, **34**(2): 262-264.
- [6] DONG Ya-dong, JIAO Zi-ti, ZHANG Hu, *et al.* Efficient algorithm for improving the hotspot effect of the operational MODIS BRDF product[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, **18**(4): 804-825.  
董亚冬, 焦子铽, 张虎, 等. 改善 MODIS BRDF 产品热点效应的方法研究[J]. 遥感学报, 2014, **18**(4): 804-825.
- [7] LI Yuan, WU Hao-yu, RONG Zhi-guo, *et al.* Field portable directional reflectance measurement system and its application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(10): 2345-2351.  
李元, 吴浩宇, 戎志国, 等. 野外便携式方向反射比测量系统及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(10): 2345-2351.
- [8] LI Y, SUN L, XU N. The comparison of BRDF model and validation of MCD43 products by the 2013 Dunhuang Gobi experiments[C]. SPIE, 2014, **9264**: 926415.
- [9] LI Yuan, ZHANG Yong, LIU Jing-jing, *et al.* Calibration of the visible and near-infrared channels of the FY-2C/FY-2D GEO meteorological satellite at radiometric site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 41-46.  
李元, 张勇, 刘京晶, 等. 风云二号静止气象卫星可见光通道辐射校正场定标方法研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 41-46.
- [10] QIU Gang-gang. Development and calibration applications of automatic observation system onsatellite radiometric calibration site[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
邱刚刚. 卫星辐射校正场自动化观测系统的研制与定标应用[D]. 中国科学技术大学, 2017.
- [11] QIU Gang-gang, LI Xin, WEI Wei, *et al.* Radiometric calibration experiment and analysis for remote sensors on-orbit based on automated observation technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(7): 0701001.  
邱刚刚, 李新, 韦玮, 等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标试验与分析[J]. 光学学报, 2016, **36**(7): 0701001.
- [12] SANDMEIER S R, ITTEN K I. A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(2): 978-986.
- [13] ZHAO C, LI X, WEI W, *et al.* The measurement and evaluation of bidirectional reflectance characteristics of Dunhuang radiometric calibration test site[C]. SPIE, 2016, **10156**: 101561S.
- [14] 顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 第一版. 北京: 科学出版社. 2013, 124-124.
- [15] ROUJEAN J L, LEROY M, DESCHAMPSP Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, **97**(D18): 20455-20468.
- [16] ROSS J. The radiation regime and architecture of plant stands[M]. Springer Netherlands, 1981.
- [17] LUCHT W, SCHAAF C B, STRAHLERA H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(2): 977-998.
- [18] LI X, STRAHLERA H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(2): 276-292.
- [19] WANNER W, LI X, STRAHLERA H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, **100**(D10): 21077-21089.
- [20] STRAHLER A H, MULLER J P, MODIS science team members. MODIS BRDF/albedo product: algorithm theoretical basis document version 5.0[Z]. 1999.
- [21] LÜ Jia-yan, HE Ming-yuan, CHEN Lin, *et al.* Automated radiation calibration method based on dunhuang radiometric calibration site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(8): 0801003.  
吕佳彦, 何明元, 陈林, 等. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法[J]. 光学学报, 2017, **37**(8): 0801003.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61505222), the Civil Aerospace Technology Advance Research Project (No.D040401), the United Foundation of Chinese Academy of Sciences (No.614A01011602), the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No.CXJJ-15S103)

引用格式: YU Tan-qi, WEI Wei, ZHANG Yan-na, *et al.* Analysis of the BRDF Characteristics of Dunhuang Radiometric Calibration Site in the Spring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0612004

余谭其, 韦玮, 张艳娜, 等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析[J]. 光子学报, 2018, **47**(6): 0612004