

文章编号:1002-2082(2018)04-0536-09

# 敦煌辐射校正场反射辐射偏振特性研究

丁满超<sup>1,2</sup>,翟文超<sup>2</sup>,张权<sup>2</sup>,韦玮<sup>2</sup>,李新<sup>2</sup>,郑小兵<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院,安徽 合肥 230026;  
2. 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,安徽 合肥 230031)

**摘要:**卫星遥感器辐射校正场的地表反射辐射测量(例如地表反射率、地表辐亮度等)对卫星遥感器的在轨定标至关重要。由于地物光谱仪自身具有一定的偏振敏感性,场地反射辐射的偏振特性将会引入偏振测量误差。采用基于偏振成像仪和塔吊的非定点测量方式以及基于偏振光谱仪和BRDF测量架的定点测量方式,测量了敦煌场490 nm和670 nm波段场地反射辐射的多角度偏振分布和局地偏振均匀性。试验结果表明,敦煌辐射校正场的反射辐射具有一定的偏振特性。偏振特性和波段有关,490 nm波段偏振度明显大于670 nm波段。490 nm和670 nm波段的多角度偏振分布关于太阳主平面对称。在太阳主平面内,前向散射区偏振度大于后向散射区,并随天顶角变大而变大。两种测量方式获得了一致的偏振特性分布规律。获得了直径100 m区域的场地反射辐射局部均匀性,均匀性在6%左右。研究场地反射辐射的偏振特性对于场地辐射探测方案的改进以及辐射测量精度的提高具有重要意义。

**关键词:**偏振;偏振光谱仪;偏振成像仪;敦煌辐射校正场;反射辐射

中图分类号:TN205;O436.3

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0403004

## Research on polarization characteristics of reflected radiation on Dunhuang radiometric calibration site

Ding Manchao<sup>1,2</sup>, Zhai Wenchao<sup>2</sup>, Zhang Quan<sup>2</sup>, Wei Wei<sup>2</sup>, Li Xin<sup>2</sup>, Zheng Xiaobing<sup>2</sup>

(1. Institute of Environment Science and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Reflected radiation measurement (such as surface reflectance, surface radiance, etc.) from the radiometric calibration site is very important for the vicarious calibration of satellite sensors. Measurement error can be caused by the polarization effect of the reflected radiation from the radiometric calibration site, because of the fact that field instruments possess a certain degree of polarization sensitivity. A non-fixed-point measurement method based on multi-band polarization imager and tower crane and a fixed-point measurement method based on spectropolarimeter and bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurement frame were adopted to measure the multi-angular polarization distribution and local polarization homogeneity

收稿日期:2018-03-20; 修回日期:2018-04-25

基金项目:国家自然科学基金(61505222)

作者简介:丁满超(1991—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事偏振遥感器定标方面的研究。

E-mail: mchding@mail.ustc.edu.cn

通信作者:翟文超(1985—),男,河南焦作人,副研究员,主要从事光学辐射定标技术、光学设计等方面的研究。

E-mail: wczhai@aiofm.ac.cn

导师简介:郑小兵(1969—),男,安徽合肥人,研究员,博士生导师,主要从事高精度光学遥感器定标技术方面的研究。

E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

of the reflected radiation at the 490 nm and 670 nm bands in Dunhuang site. The results show that the reflected radiation from Dunhuang site possesses a certain degree of polarization characteristics. The polarization characteristics is wavelength-depended, the degree of polarization (DOP) of 490 nm band is obviously higher than 670 nm band, and the multi-angle polarization distribution is symmetric about the principle plane defined by the sun and instrument. In the principle plane, the DOP in forward scattering area (FSA) is higher than backward scattering area (BSA), and the DOP increased by the increasing of the view zenith angle (VZA). The angle distribution feature is fully consistent for the non-fixed-point method and fixed-point method. The local polarization homogeneity is about 6% for  $\Phi 100$  m dimension area. The research on the polarization characteristics of reflected radiation from the calibration site is of great significance to the vicarious calibration scheme establishment and radiation measurement accuracy improvement.

**Key words:** polarization; spectropolarimeter; polarization imager; Dunhuang radiometric calibration site; reflected radiation

## 引言

基于场地的替代定标方法是卫星遥感器在轨定标的重要手段。在外场替代定标中,通过在辐射定标场现场实测地表和大气参数<sup>[1-2]</sup>,输入辐射传输模型<sup>[3]</sup>,计算得到卫星入瞳辐亮度,结合卫星过境时刻观测数据,实现卫星遥感器的在轨辐射定标。在场地替代定标方法中,“反射率基法”是发展最早,应用最为成熟的技术手段<sup>[4-5]</sup>,目前仍是场地替代定标中的主流技术手段。因此辐射校正场地表特性的精确表征至关重要。

在卫星遥感器外场替代定标过程中,入射到地面的辐射分为太阳直射辐射和天空漫射辐射,受大气分子散射、气溶胶粒子散射的影响,天空漫射辐射中存在明显的偏振成分<sup>[6]</sup>。由于地面反射并非理想的漫反射,其消偏效果有限,这部分偏振光成分经过地面漫射后仍然会存在偏振残留,进而在地面反射辐射中引入偏振效应。另一方面,地表自身的粗糙度也会影响其反射光的偏振状态,相关研究表明,在不同的粗糙度状态下,反射光的偏振态存在差异<sup>[7-8]</sup>。因此,有必要对试验场地反射辐射的偏振特性进行研究,评估实验条件下的地表反射辐射的偏振状态、角度分布规律等信息。

敦煌辐射校正场是我国遥感卫星辐射定标的重要场地,业界对敦煌校正场地表特性表征方面做了大量的工作,例如场地的均匀性,场地的双向反射比分布函数(BRDF)测量、场地反射率的稳定性以及季节变化等,但对场地地表反射辐射的偏振特性研究较少。场地反射率由地表反射辐射和

参考板的反射辐射比对测量得到,特别是目前场地反射率的测量主要借助于地物光谱仪,如 SVC 和 ASD 等,其内部使用了反射、光栅色散式的光路结构,这种光路结构不可避免会引入偏振效应,相关的研究也证实这类地物光谱仪自身存在偏振敏感性<sup>[9-10]</sup>。当使用这类设备进行场地反射率测量时,如果场地反射辐射中存在偏振特性,则偏振效应必然会引入场地反射率的测量误差(由于参考板良好的朗伯特性,其偏振效应可以忽略)。

本文利用通道式偏振成像仪和偏振光谱仪(经过偏振改造的 ASD 光谱仪)对敦煌辐射校正场反射辐射的偏振特性进行了研究,获得了实验条件下的敦煌辐射校正场场地反射辐射的偏振特性。本文介绍了场地反射辐射偏振特性测量的基本原理,详细介绍了所采用的偏振成像仪和偏振光谱仪两种测量方案,最后对测量结果进行了分析。

## 1 场地反射辐射的偏振特性测量原理

光具有波粒二象性,根据麦克斯韦方程组可知,光是矢量波。光的偏振现象就是光的矢量性质的表现,是光波的一种基本性质。根据电场矢量  $\mathbf{E}$  的端点所描绘的轨迹区分,偏振光分为椭圆偏振光、线偏振光和圆偏振光。对光偏振态的定量描述,主要采用 Stokes 矢量法,因此对于任一单色平面波,其偏振态可用参量  $I, Q, U, V$  表述为

$$\mathbf{S} = [I \quad Q \quad U \quad V]^T \quad (1)$$

式中: $I$  为非偏振分量; $Q, U$  为 2 个方向上的线偏

振分量;  $V$  为圆偏振分量, 在自然界中, 地表反射的圆偏振分量较小, 故本文暂不考虑, 默认  $V=0$ 。

计算 Stokes 参量, 需要知道系统的 Mueller 矩阵, 对于入射光射入一个理想起偏器时, 与参考方向成  $\theta$  角的理想起偏器 Mueller 矩阵如下:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则出射光的 Stokes 参量  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  与入射光  $\mathbf{S}_{\text{in}}$  的关系为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}} \quad (3)$$

即为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} I_{\text{out}} \\ Q_{\text{out}} \\ U_{\text{out}} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可知单色出射光的  $I_{\text{out}}$  与入射光  $[I \quad Q \quad U]^T$  的关系, 如(5)式所示。

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\theta + U\sin 2\theta) \quad (5)$$

对于典型的三偏振通道探测仪来说, 定义其三通道相对于基准方向的偏振方向分别为  $a$ 、 $b$  和  $c$ , 典型的角度取  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  或者  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ , 将偏振片透光轴方向角度代入(5)式联立方程组可得:

$$\begin{bmatrix} I_{\text{out}}^a \\ I_{\text{out}}^b \\ I_{\text{out}}^c \end{bmatrix} = \mathbf{M}' \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2a & \sin 2a \\ 1 & \cos 2b & \sin 2b \\ 1 & \cos 2c & \sin 2c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $I_{\text{out}}^a$ 、 $I_{\text{out}}^b$  和  $I_{\text{out}}^c$  分别为目标辐射经过偏振探测仪 3 个偏振通道后的分量。

由于光学元件差异和探测器的差异, 偏振探测仪的偏振通道间通常会存在响应非一致性, 综合表现为各偏振通道响应度的差异, 需要在实验室进行通道响应非一致性校正。常采用的方法是使用积分球无偏光源, 在输入辐亮度已知的情况下获得各偏振通道的相对校正系数。假设对应偏振探测仪某光谱通道  $\lambda_i$  的积分球光源辐亮度为  $L(\lambda_i)$ , 则有下式成立:

$$L(\lambda_i) = DN_a^{L(\lambda_i)} R_a(\lambda_i) = DN_b^{L(\lambda_i)} R_b(\lambda_i) = DN_c^{L(\lambda_i)} R_c(\lambda_i) \quad (7)$$

式中  $DN_a^{L(\lambda_i)}$ 、 $DN_b^{L(\lambda_i)}$  和  $DN_c^{L(\lambda_i)}$  分别是偏振探测仪观测积分球光源时光谱通道  $\lambda_i$  3 个偏振通道的

响应值;  $R_a(\lambda_i)$ 、 $R_b(\lambda_i)$  和  $R_c(\lambda_i)$  是 3 个偏振通道的辐射响应度。根据(7)式, 以通道  $b$  为参考通道, 则通道  $a$  和  $c$  相对  $b$  进行校正可得:

$$\begin{cases} R_a(\lambda_i) = T_a(\lambda_i) R_b(\lambda_i) = DN_b^{L(\lambda_i)} / DN_a^{L(\lambda_i)} \cdot R_b(\lambda_i) \\ R_b(\lambda_i) = T_b(\lambda_i) R_b(\lambda_i) \\ R_c(\lambda_i) = T_c(\lambda_i) R_b(\lambda_i) = DN_b^{L(\lambda_i)} / DN_c^{L(\lambda_i)} \cdot R_b(\lambda_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $T_a(\lambda_i)$ 、 $T_b(\lambda_i)$  和  $T_c(\lambda_i)$  是光谱通道  $\lambda_i$  3 个偏振通道的响应非一致性校正系数, 其中  $T_b(\lambda_i) = 1$ 。目标观测时, 可得到偏振探测仪光谱通道  $\lambda_i$  的偏振测量方程如(9)式所示。

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \mathbf{M}'^{-1} \begin{bmatrix} DN_a^T(\lambda_i) R_a(\lambda_i) \\ DN_b^T(\lambda_i) R_b(\lambda_i) \\ DN_c^T(\lambda_i) R_c(\lambda_i) \end{bmatrix} = \mathbf{M}'^{-1} R_b(\lambda_i) \begin{bmatrix} DN_a^T(\lambda_i) T_a(\lambda_i) \\ DN_b^T(\lambda_i) \\ DN_c^T(\lambda_i) T_c(\lambda_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $DN_a^T(\lambda_i)$ 、 $DN_b^T(\lambda_i)$  和  $DN_c^T(\lambda_i)$  分别为偏振探测仪  $a$ 、 $b$ 、 $c$  3 个偏振通道测量目标时的响应值。

目标辐射的偏振度可由(10)式计算得到。

$$P = \sqrt{\frac{Q^2 + U^2}{I}} \quad (10)$$

由(7)式和(8)式可知,  $R_b(\lambda_i)$  为公共参量, 故偏振度结果仅与偏振片透光轴方向( $a$ 、 $b$  和  $c$ )、探测器测量目标的实际响应值( $DN_a^T(\lambda_i)$ 、 $DN_b^T(\lambda_i)$  和  $DN_c^T(\lambda_i)$ )和响应非一致性系数( $T_a(\lambda_i)$ 、 $T_b(\lambda_i)$  和  $T_c(\lambda_i)$ )有关, 其中 3 个偏振通道的偏振片透光轴方向和通道间响应非一致性校正系数通过实验室定标得到。

## 2 测量方案

为获得敦煌辐射校正场反射辐射的偏振特性, 本文使用多波段偏振成像仪和偏振光谱仪两种工作体制的设备分别进行了场地多角度偏振分布测量, 其中多波段偏振成像仪吊装在塔吊上, 通过控制塔吊悬臂运动, 实现了非定点的偏振测量; 偏振光谱仪安装在手动控制的 BRDF 测量架上, 通过控制 BRDF 测量架导轨运动, 实现固定点偏振测量(BRDF 测量架中心处)。借助塔吊 50 m 长悬臂上的径向运动和悬臂的旋转运动, 获得了直径 100 m 圆周区域的局部偏振分布均匀性。

### 2.1 测量设备介绍

试验中使用了多波段偏振成像仪和偏振光谱

仪,两种设备的详细介绍如下。

### 1) 多波段偏振成像仪

图 1 为多波段偏振成像仪的三维模型, 主要由 CCD 相机头部和二维云台组成。CCD 相机头部集成了三分束同时成像 CCD 相机和滤光片转轮, 试验时配备了 490 nm 滤光片和 670 nm 滤光片。成像仪采用分振幅偏振探测光路原理, 可同时获得  $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$  3 个方向的偏振图像, 二维云台主要用于改变 CCD 相机的观测几何。仪器图像数据处理时, 采用  $10^\circ$  视场。尽量减少仪器自身因视场过大而引入的较大偏振误差, 同时匹配偏振光谱仪的视场。仪器实验室偏振度定标误差优于 1%。

### 2) 偏振光谱仪

偏振光谱仪<sup>[10]</sup> 主要由 ASD 光谱仪搭配偏振测量组件后改装而成, 如图 2 所示, 具体的改装方案如下: 在 ASD 光纤镜头前面加装偏振测量组件, 偏振测量组件主要由偏振片和退偏器组成, 在组件外部添加角度刻线, 用于控制偏振片角度。退偏器的作用是将透过偏振片的偏振光退偏成非偏光, 消除仪器自身的偏振特性的影响, 提高仪器偏振测量精度。偏振探测需要分时测量 3 个方向  $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 。偏振测量组件的孔径光阑视场是  $10^\circ$ , 偏振光谱仪的实验室偏振定标误差小于 1.5%。两台仪器主要参数见表 1。

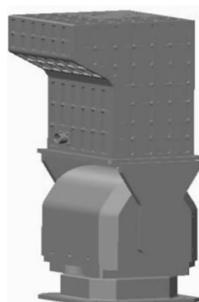


图 1 偏振成像仪

Fig. 1 Polarization imaging instrument

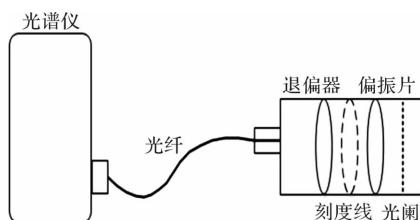


图 2 偏振光谱仪

Fig. 2 Spectropolarimeter

表 1 仪器主要参数

Table 1 Main parameters of instruments

偏振仪器	多波段偏振成像仪	偏振光谱仪
波段/nm	490 和 670	350~2 500
光谱分辨率/nm	$\sim 40$ (FWHM)	3@700 8@1 400/2 100
视场/( $^\circ$ )	10	10
工作方式	自动/同时观测	手动/分时观测
偏振方向/( $^\circ$ )	$(0, 45, 90)$	$(0, 60, 120)$
绝对误差(DoLP)/%	$\sim 1$	$\sim 1.5$

## 2.2 场地反射辐射多角度偏振测量方案

地表辐射的偏振特性和太阳几何方位以及仪器观测几何密切相关, 为获得地表辐射的多角度偏振分布特征, 设计了场地地表辐射的多角度偏振分布测量方案, 本文采用了基于多波段偏振成像仪的非定点测量和偏振光谱仪的定点式测量两种测量方案。

### 2.2.1 偏振成像仪非定点测量方案

多波段偏振成像仪受体积和重量的限制, 为了获得更为精准的观测几何以及更大范围的场地图像, 本文采用场地塔吊辅助实验。图 3 是实验现场仪器的安装照片。偏振成像仪固定在吊篮(配重)的下端, 吊篮固定于塔吊吊钩之上, 偏振成像仪初始位置为竖直向下。图 4 是实验现场总体图。

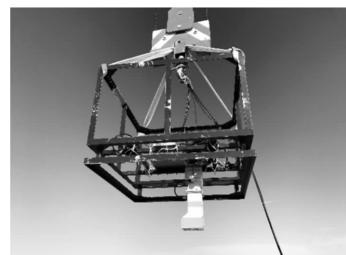


图 3 偏振成像仪安装现场

Fig. 3 General installation diagram of instrument installation



图 4 试验现场照片

Fig. 4 Photo of field experiment

偏振成像仪采用非定点方式进行测量, 非定点测量方式如图 3 所示, 在非定点测量过程中, 仪器与场地的相对位置不变, 控制仪器上的二维转台进行测量, 具体的测量流程如下。

1) 首先从初始方位面开始, 固定转台方位角

度不变,仪器从天顶 $-60^\circ$ 开始测量,以 $15^\circ$ 为间隔,测量至天顶 $60^\circ$ ,完成初始方位面的测量,测量结束时保持仪器天顶观测角度不变(保持在该方位面测量结束时的天顶角度)。

2) 控制转台以 $30^\circ$ 为间隔,转动至下一个方位面,转动结束后保持转台方位角不变。控制仪器在该方位面内进行天顶测量,天顶角度起始位置为上一个方位面测量结束时的天顶角度,角度间隔为 $15^\circ$ 。

3) 重复上述过程,直到完整一周测量完成。

图5所示为偏振成像仪在每个方位面内的天顶测量示意图,测量范围均为 $(-60^\circ, 60^\circ)$ ,以 $15^\circ$ 为间隔,共9个位置。图6所示为整个圆周内的所有非定点测量的测量点,仪器位于圆周正中心,图6中箭头指示了测量轨迹,圆点代表每个测量点。从图中可以看出共6个测量方位面,每个方位面共9个天顶测量点。由于偏振成像仪采用自动化控制,分振幅同时成像,为尽可能减小太阳几何方位变化对测量带来的影响,测量总时间控制在20 min内。

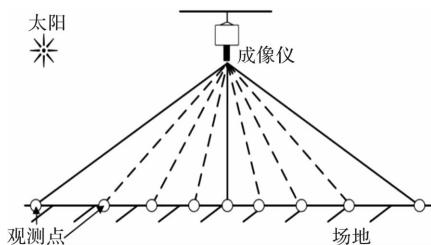


图5 主平面测量示意图

Fig. 5 Diagram of main plane

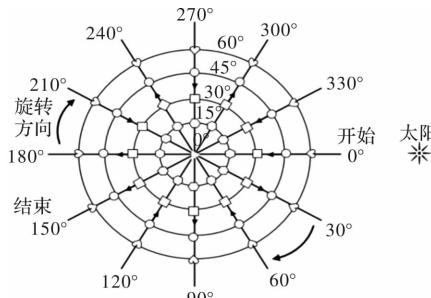


图6 测量点位置

Fig. 6 Measurement positions (non-fixed point)

## 2.2.2 偏振光谱仪定点测量方案

偏振光谱仪采用便携式BRDF手动测量架进行场地反射辐射偏振特性测量,手动测量架如图7所示。偏振光谱仪的偏振测量组件固定在测量架的滑轮机构上,天顶角测量间隔 $15^\circ$ ,方位角测量间隔 $30^\circ$ ,每个位置测量3个偏振方向,即偏振片依次转动 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ ,测量位置点如图8所示。

偏振光谱仪采用手动测量方案,每一个位置测量3个方向,每个方向测量3次数据,由于采用了人工测量,为减少测量时间过长,太阳方位角变化对测量结果的影响,每轮测量时,以太阳方位面为轴面,仅测量半球空间的一半,每轮测量时间小于20 min。



图7 BRDF 手动测量装置

Fig. 7 BRDF manual measuring instrument

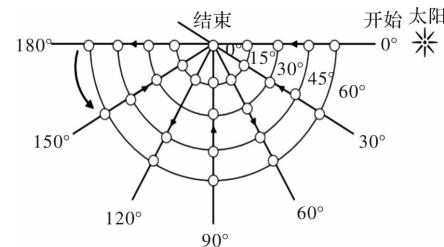


图8 定点测量位置

Fig. 8 Measurement positions (fixed point)

## 2.3 场地局部均匀性测量方案

本文利用多波段偏振成像仪配合塔吊进行了场地局部偏振分布均匀性的评估。试验时,多波段偏振成像仪固定于吊篮下方,并始终保持竖直向下观测。塔吊臂长50 m,因此实验主要评估塔吊周边场地直径100 m区域的局部场地。

设计了两种测试模式,一种模式方法见图9所示,塔吊悬臂按方位角旋转,角度间隔为 $45^\circ$ ,塔吊悬臂旋转一周,共设置8个方位角测量点。在每个方位角的测量点上,控制多波段偏振成像仪采集数据10次,取该点10次测量结果的平均值代表该测量点的地表反射辐射偏振度,这种测量模式称为“圆周模式测量”;另一种模式如图10所示,控制塔吊悬臂上的滑轮运动,使多波段偏振成像仪沿悬臂径向运动,共设置8个测量点,每个测量点共采集10个数据,取10个测量数据的平均值代表该测量点的地表反射辐射偏振度,这种测量模式称为“线模式测量”。考虑到尽可能控制测量时间,减少太阳几何方位变化对测量的影响,仅在一个方位角位置进行了线模式测量。考虑到仪器采用 $10^\circ$ 视场,吊于约30 m高度,视场观测范围为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ ,考虑到塔吊臂长50 m,采集8个位置,不会出

现视场重叠。

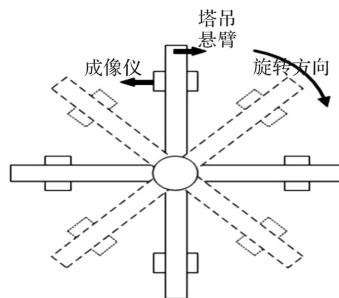


图 9 探测器圆周移动测量

Fig. 9 Measurement of circular motion of detector

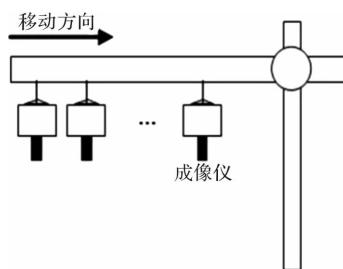


图 10 探测器直线移动测量

Fig. 10 Measurement of linear motion of detector

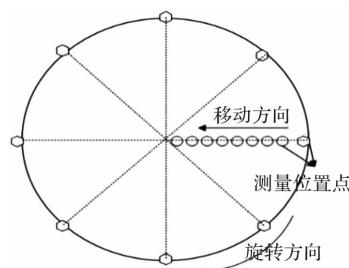


图 11 测量点标记

Fig. 11 Measurement positions

### 3 敦煌场地反射辐射偏振特性分析

#### 3.1 场地非定点测量结果分析

采用多波段偏振成像仪对场地地表反射辐射

进行非定点观测。图 12 是 490 nm 偏振特性分布热图,图 13 是 670 nm 偏振特性分布热图,可以看出,场地在前向散射区的偏振度明显大于后向散射区(太阳几何信息见图中文字标注),同时相对于太阳主平面,偏振分布具有一定的对称性。在太阳主平面的前向散射区,观测天顶( $0^\circ, 60^\circ$ )范围内,偏振度随着天顶角的增大而增大,偏振度 490 nm 通道热图出现了“冷点”,原因是“冷点”位置刚好是通向塔吊的通道,场地自然面貌遭到破坏,破坏了场地本身的自然特性,偏振度出现明显变化。

#### 3.2 场地定点测量结果分析

使用偏振光谱仪对场地地表反射辐射的定点多角度偏振度测量结果如图 14 所示,比较图 12~15 可知,两者测量结果中偏振度的总体分布趋势完全吻合,均为前向散射区的偏振特性明显大于后向散射区的偏振特性,同时在前向散射区,天顶角度越大,偏振度也越大。

根据图 12~15,两种方法获得的地表反射辐射偏振度的数值存在一定的差异,原因之一在于两种测量方法的实验时间不同,自然条件和观测几何存在差异;另一个原因在于偏振光谱仪观测区域仅为直径 20 cm 左右,而多波段偏振成像仪位于 30 m 高的塔吊上,地面观测区域为 4 m  $\times$  4 m 区域,偏振度观测结果为该区域的统计结果,在较大的观测区域上存在平均效应。

#### 3.3 场地局部均匀性结果分析

受实验条件限制,场地局部偏振均匀性数据均来自塔吊半径 50 m 的周边场地,测量结果见图 16。从图 16 可以看出,圆周测量模式的数据波动大于线测量模式,一个可能的原因在于塔吊在旋转过程中,引起了仪器的摆动,改变了仪器的观测几何,而线测量模式下,仪器的摆动较小,基本保持了观测几何的固定。

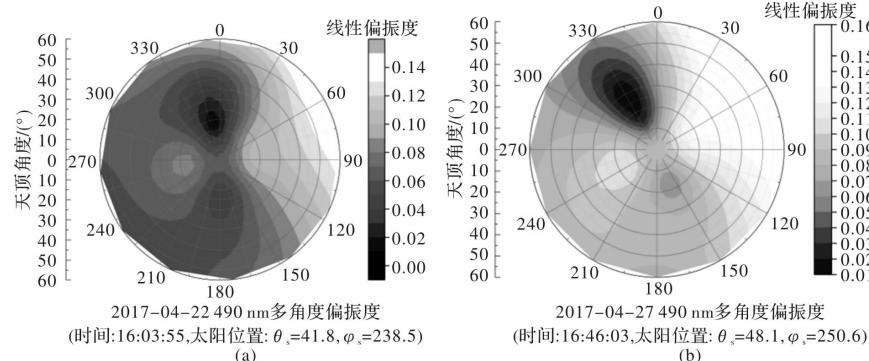


图 12 偏振成像仪 490 nm 多角度偏振分布

Fig. 12 Multi-angle polarization distribution of 490 nm polarization imager

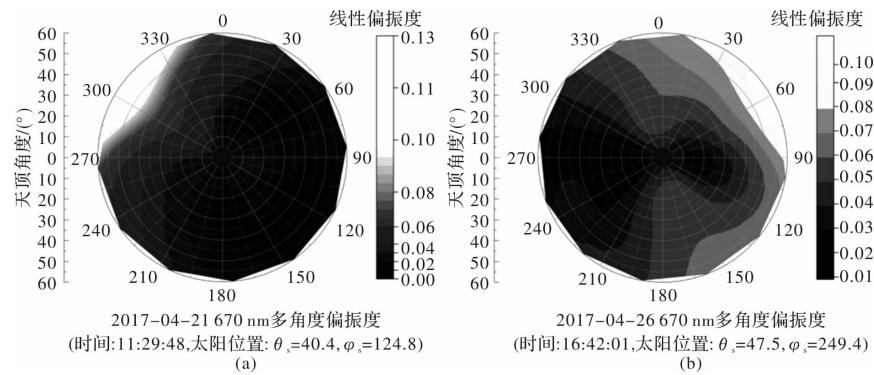


图 13 偏振成像仪 670 nm 多角度偏振分布

Fig. 13 Multi-angle polarization distribution of 670 nm polarization imager

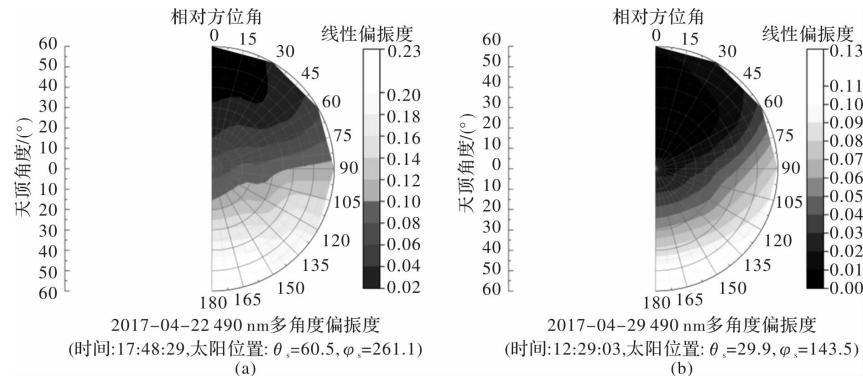


图 14 偏振光谱仪 490 nm 多角度偏振分布

Fig. 14 Multi-angle polarization distribution of 490 nm polarization spectrometer

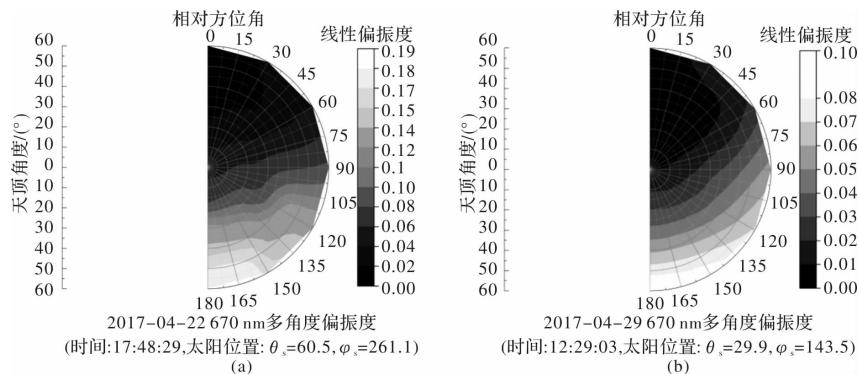


图 15 偏振光谱仪 670 nm 多角度偏振分布

Fig. 15 Multi-angle polarization distribution of 670 nm polarization spectrometer

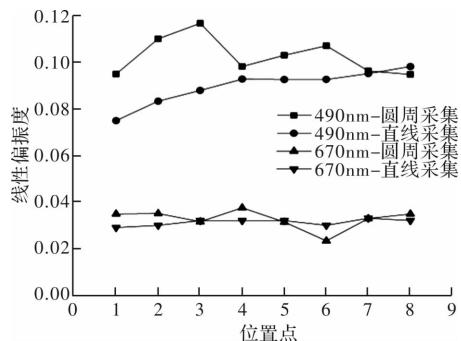


图 16 局部场地偏振均一性数据

Fig. 16 Polarization uniformity data in local site

根据图 16, 490 nm 通道的偏振度高于 670 nm 通道的偏振度, 这也和相关的研究结果一致<sup>[11]</sup>。通过局部地表反射辐射的偏振均匀性分析, 490 nm 圆周测量模式下得到的非均匀性结果为 8.0%, 线测量模式下得到的均匀性结果为 8.9%; 对于 670 nm 通道来说, 圆周测量模式下得到的非均匀性结果为 6.8%, 线测量模式下得到的均匀性结果为 4.4%。整体而言, 场地反射辐射的局部均匀性在 6% 左右。具体测量结果见表 2, 表中数据 6 由于图像中出现测量架阴影, 故从数据中剔除。

表 2 场地偏振均匀性数据  
Table 2 Site polarization uniformity data

波长 /nm	运动方式	线性偏振度								均值	标准差
		数据 1	数据 2	数据 3	数据 4	数据 5	数据 6	数据 7	数据 8		
490	圆周测量	0.095	0.110	0.117	0.098	0.103	—	0.096	0.098	0.102	0.0082
	线测量	0.075	0.083	0.088	0.093	0.093	—	0.095	0.098	0.089	0.0079
670	圆周测量	0.035	0.035	0.032	0.038	0.031	—	0.033	0.035	0.034	0.0023
	线测量	0.029	0.030	0.032	0.032	0.032	—	0.033	0.032	0.031	0.0014

2004, 16(2):149-153.

孙毅义, 董浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 149-153.

- [4] CZAPLAMYERS J S, THOME K J, LEISSO N P. Calibration of AVHRR sensors using the reflectance-based method[J]. SPIE, 2015, 6684:668407-1-10.
- [5] METSÄMÄKI S, MATTILA O P, PULLIAINEN J, et al. An optical reflectance model-based method for fractional snow cover mapping applicable to continental scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123:508-521.
- [6] GUAN Guixia, YAN Lei, CHEN Jiabing, et al. Research on sky polarized light distribution[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4):459-463.
- 关桂霞, 娑磊, 陈家斌, 等. 天空偏振光分布的实验研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(4):459-463.
- [7] ZHAO Yunsheng, WU Taixia, HU Xinli, et al. Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(6):441-444.
- 赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(6):441-444.
- [8] WU Taixia, YAN Lei, XIANG Yun, et al. Polarization reflection effect of plane rough surface under vertical observation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(2):151-155.
- 吴太夏, 娥磊, 相云, 等. 垂直观测时水平粗糙地表偏振反射作用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(2): 151-155.
- [9] LÉVESQUE M P, DISSANSKA M. Field spectrometer measurement errors in presence of partially polarized light; evaluation of ground truth measurement accuracy [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27199-27211.
- [10] LI Jinjin, SUN Xiaobing, KANG Qing, et al. Polari-

## 4 结论

本文利用多波段偏振成像仪和偏振光谱仪测量了敦煌辐射校正场反射辐射的偏振特性, 测量波段为 490 nm 和 670 nm 波段。可知场地的反射辐射具有一定的偏振特性, 场地局部偏振均匀性约为 6% 左右; 场地反射辐射的多角度偏振分布以太阳方位面为轴面, 呈现一定的对称性。偏振特性与观测几何密切相关, 前向散射区的偏振特性高于后向散射区, 在太阳方位面的前向散射区, 观测天顶在(0°, 60°)范围内, 偏振度随着观测天顶角的增大而增大; 偏振特性和波段有关, 490 nm 波段的偏振度明显高于 670 nm 的偏振度。事实上, 场地反射辐射的偏振特性是综合了大气和地表特征影响的总体结果, 因此配合大气观测设备(如偏振太阳辐射计等)观测数据对深入研究场地反射辐射偏振效应具有重要价值。此外, 场地反射辐射的偏振特性也和场地表面特性有关, 在后续工作中, 深入研究场地表面特性(如粗糙度、均匀性等)和反射辐射偏振特性的关系, 配合大气观测数据, 建立场地偏振散射模型, 对进一步提高外场辐射定标精度具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] ELLICOTT E, VERMOTE E, PETITCOLIN F, et al. Validation of a new parametric model for atmospheric correction of thermal infrared data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 47(1):295-311.
- [2] ANDREAE M O. Correlation between cloud condensation nuclei concentration and aerosol optical thickness in remote and polluted regions[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2009, 9(2):543-556.
- [3] SUN Yiyi, DONG Hao, BI Zhaohui, et al. Intercomparison of models for radiative transfer in the atmosphere[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2013, 25(1):1-6.

- zation detection accuracy analysis of spectropolarimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47 (1):230021-230027.
- 李金金,孙晓兵,康晴,等. 偏振光谱仪偏振探测精度分析 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (1): 230021-230027.
- [11] SUN W, BAIZE R R, LUKASHIN C, et al. Deriving polarization properties of desert-reflected solar spectra with PARASOL data [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(6):8525-8564.