

光学学报

基于地面与低空无人机联合观测场地 BRDF 建模方法

何玉青^{1*}, 胡文杰^{1**}, 胡秀清^{2,3***}, 朱吉彪², 何兴伟^{2,3}, 金伟其¹

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

²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, 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

³许健民气象卫星创新中心, 北京 100081

摘要 双向反射分布函数(BRDF)是星载传感器进行场地替代定标中的重要参量,随着技术的进步,低空自旋翼无人机已经成为了获取场地 BRDF 的便捷高效手段,通过现场测量准不变定标场的无人机多角度观测光谱数据,建立更加准确的 BRDF 模型还能进一步挖掘潜力。提出一种基于地-空双光谱仪联合观测加漫射板观测并消除漫射光影响的 BRDF 建模方法。使用无人机搭载光谱仪进行场地光谱的低空测量,获取半球空间内多角度下的场地光谱数据,同时开展地基光谱仪联合同步测量漫射参考板,连续记录照明光场的变化以及漫射光照明下的场地光谱数据。联合空地双光谱仪对目标和参考板实测的辐亮度数据,结合太阳及观察角度之间的几何观测,计算场地的多角度反射率。基于 Ross-Li 核驱动半经验模型对多角度反射率数据进行拟合,采用最小二乘法对模型系数进行拟合,以得到最优的场地 BRDF 模型,并对模型进行漫射光校正。实验证明,经漫射光校正后的 BRDF 模型各波段的相对偏差均值都在 5% 以内,相对偏差标准差在 3% 以内,有效消除了场地 BRDF 建模在漫射光照射下的干扰,提高了 BRDF 建模的准确性。

关键词 双向反射分布函数; 无人机; 双光谱仪; 双向反射分布函数建模; 漫射光校正

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230941

1 引言

二向性反射是物体反射电磁波的基本现象,即物体表面对外来辐射的反射不仅具有方向性,而且这种方向性还因入射辐射的方向不同而异。随着太阳入射角和观测角的变化,物体表面的反射有明显差异。通常使用双向反射分布函数(BRDF)来描述物体的二向性反射特征^[1],该函数定义为来自入射方向的地表辐照度的微增量与其所引起的反射方向的反射辐射亮度增量之间的比值。在陆面遥感中,BRDF 能够帮助我们更好地理解地表辐射的反射特性,推断地表的覆盖类型、覆盖度、植被生长状况等信息^[2];在星载遥感器基于地面目标的场地替代定标中,BRDF 是描述场地的一个重要过程参量,是影响定标精度的关键要素^[3-6];在计算机图形学领域,BRDF 对渲染出更具真实感的图形有着重要作用^[7]。

BRDF 描述为出射辐亮度随着某个人射方向照度的变化,而非入射方向的入射辐射大小及其分布无关。在野外条件下,对地表方向反射特性进行测量时,

我们无法限制非入射方向的照度,目标不但受太阳光直接照射,还受到 2π 空间内的大气散射光照射^[8-9],这就为 BRDF 的测量引入了一定的系统误差。因此,除了选择天气晴朗无云、大气光学气溶胶厚度低的测量环境外,还通常使用实测的半球方向反射比因子(HDRF)反演得到 BRDF。HDRF 是在太阳直射光和天空漫射光同时存在时测得的对目标物半球方向的反射特性^[10]。

近年来,随着无人机(UAV)技术的发展,无人机已开始被作为光学遥感器搭载平台,进行低空下地表方向反射特性的测量^[11-12]。Hakala 等^[9]使用安装在无人机上的数码相机来获取积雪地表反射率的各向异性;Burkart 等^[13]使用无人机搭载高光谱光谱仪收集多个植被区域的多角度数据;陶炳成等^[14]使用六旋翼无人机与增稳平台搭载光谱仪对敦煌辐射校准场进行 BRDF 特性测量。相较于传统测角仪系统,无人机测量系统拥有着轻便便携、适应复杂地形及目标的观测的优势。为了消除测量过程中由于太阳变化带来的太阳辐亮度测量偏差,Bachmann 等^[15]提出采用双光谱仪

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-07-05; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902900, 2022YFB3902901, 2018YFB0504901)

通信作者: *yuqinghe@bit.edu.cn; **huwenjiebit@163.com; ***huxq@cma.gov.cn

测量方式,地面固定一台光谱仪测量参考板,同时测量人员携带另一台光谱仪在次优大气条件下测量目标光谱反射率,Doctor等^[10]在分析沙滩中沙子的BRDF的波长依赖性的研究中同样使用了双光谱仪测量方式,测量目标的光谱仪安置于测角仪上,另一台光谱仪位于固定位置持续测量参考板。在先前的研究中,常选择低光学气溶胶厚度、无云的晴朗自然条件进行实验测量,而在后续的BRDF建模中忽略了漫射光的影响,这不仅对野外实验提出苛刻的天气要求,还使后续BRDF拟合的结果仍受漫射光的影响。

本文使用无人机平台搭载光谱仪,结合地基光谱仪,提出一种基于地-空双光谱仪联合观测加漫射板观测并消除漫射光影响的BRDF建模方法。无人机平台体积小、质量轻、受地形限制小,便于对各种复杂地形进行测量;地基光谱仪可以持续测量照明光场下的变化。以此对西北准不变定标场的BRDF特性进行测量,分析在野外环境下,不同大气条件对BRDF反演的影响。通过在实际沙漠场景下的实验验证本文所提出

方法的有效性和实用性,有效消除沙漠目标BRDF建模在漫射光照射下的干扰,提高BRDF建模的准确性。

2 自然环境下BRDF的测量模型

2.1 空地同步观测系统

空地同步BRDF观测系统的构成及观测模式如图1所示,包含机载光谱测量系统、地基光谱仪测量系统、太阳光度计及全天空成像仪,为了确保各仪器测量时互不干扰,各部件安置位置至少间隔30 m。实验使用RS-8800高性能地物光谱仪,可在2~3 s内实现350~2500 nm的可见-近红外全波段光谱数据的测量,能够采用外置触发进行测量。空中观测以无人机作为光谱仪搭载平台,在不破坏目标表面的条件下,高效率地实现低空对地多角度测量。在半径50 m的半球观测空间内,按照观测天顶角范围为0°~50°(10°间隔),观测方位角范围为0°~360°(30°间隔),以顺时针方向设置61个观测点,即每个测量架次获得61条不同角度下的地表高光谱数据,全天按时间段共设置6个观测组。

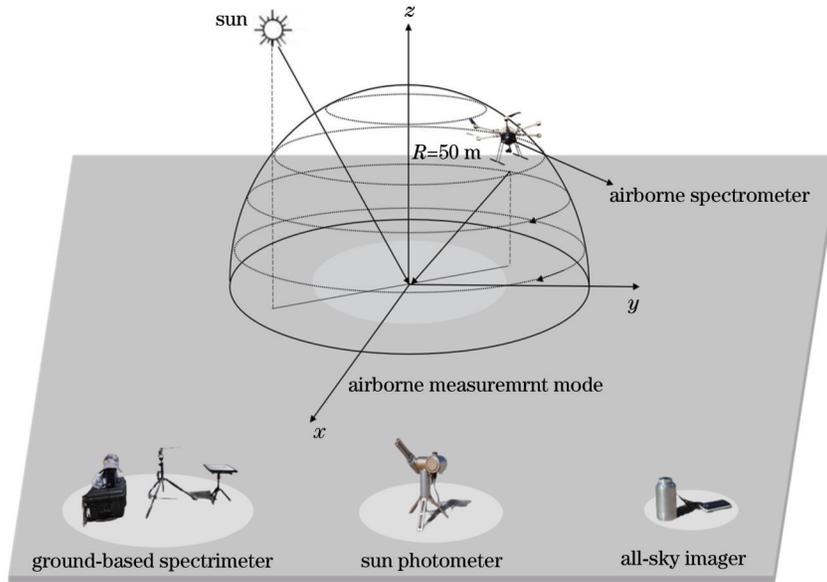


图1 BRDF同步观测系统组成及观测模式

Fig. 1 Components and observing mode of the BRDF measurement system

地基测量系统由地基光谱仪测量系统、遮挡板、太阳光度计和全天空成像仪组成,如图2所示。为同步监测实验过程中照明光场的变化,选取观测场地附近的平坦地表,使用另一台RS-8800地物光谱仪按照参考板、遮挡参考板、地表、遮挡地表的顺序进行同步测量,根据太阳视半径和光谱仪的视场大小,实验中选择的遮挡板半径为0.35 m。通过测量遮挡参考板和遮挡地表,可以计算出环境的漫总比,也为后续漫射光校正测量提供所需数据。CW193太阳光度计用以测量大气信息,ASC-200全天空成像仪记录当天云量。

2.2 空地同步观测的BRDF测量模型

地物表面的方向反射特征BRDF可以表示为反射

方向光谱辐亮度微增量与入射辐射照度微增量的比值^[1]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)} \quad (1)$$

式中: θ_i 为太阳天顶角, φ_i 为太阳方位角,两者组合表示入射光的方向; θ_r 为观测天顶角, φ_r 为观测方位角,两者组合表示出射光的方向; λ 为波长; dL_r 是由入射光增量引起的反射光方向光谱辐射亮度 L_r 增量, dE_i 为在一个微分面元 dA 入射光方向 (θ_i, φ_i) 的微分立体角内光谱辐照度 E_i 的增量。

实际为了得到物体的BRDF,可以使用地物光谱仪测量辐射通量,通过计算双向反射比因子(BRF)求

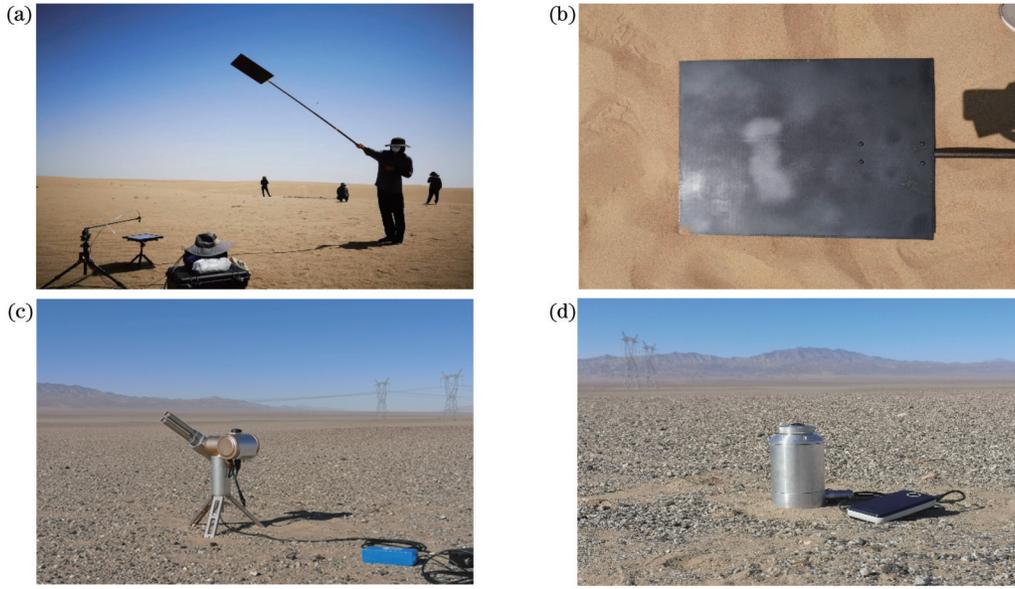


图 2 地基同步测量系统。(a)地基光谱仪测量系统;(b)遮挡板;(c)太阳光度计;(d)全天空成像仪
Fig. 2 Ground-based synchronous measurement system. (a) Ground-based spectrometer measurement system; (b) shading board; (c) solar radiometer; (d) all-sky imager

取 BRDF。BRF^[8]定义为直射光入射条件下某一观测方向上目标反射辐射通量与假定该目标被以理想漫反射表面代替反射的辐射通量之间的比值

$$R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{d\phi(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{d\phi_{id}(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{\cos \theta_r \sin \theta_i dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) d\theta_r d\varphi_r dA}{\cos \theta_r \sin \theta_i dL_r(\theta_i, \varphi_i) d\theta_r d\varphi_r dA} = \frac{f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{f_{id}(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (2)$$

式中： $d\phi(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 为接收到的目标的微分反射通量； $d\phi_{id}(\theta_i, \varphi_i)$ 为理想漫反射表面反射到观测方向上的分辐射通量，因为漫反射表面的反射与出射方向无关，所以省略观测角度。由于理想的漫反射表面在所有观察方向上反射相同的辐射，故理想朗伯表面的 BRDF 为 $f_{id}(\theta_i, \varphi_i) = 1/\pi$ 。因此，由式(2)得出任何表面的 BRDF 等于它的 BRF 除以 π 。

BRF 为入射光和反射光指定了无限小的光束条件下的测量，在野外测量环境中，无法做到照明条件为单一方向，因此引入半球-方向反射比因子(HDRF)。其定义为自然光入射条件下，观测目标向某一观测方向反射的辐射通量与假定该目标被一理想漫反射表面替代时的辐射通量的比值^[8]，公式为

$$R(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r) = \frac{d\phi(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r)}{d\phi_{id}(\theta_i, \varphi_i, 2\pi)}. \quad (3)$$

由于自然条件下入射光是由一定比例的理想直射光与理想漫射光组合而成的，所以式(3)可写为

$$R(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r) = (1-s)R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) + sR(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r), \quad (4)$$

式中： s 为漫射光通量占总入射光通量的比例。当天空

非常晴朗，气溶胶光学厚度低，没有云时，可以忽略漫射光影响，近似认为 HDRF 约等于 BRF，从而由测量数据求得目标的 BRDF。

为了求得 BRDF，首先需要计算出目标表面的多角度反射率。通过空地双光谱仪同步测量目标表面与参考板的辐亮度，计算二者的比值来得到目标的反射率^[16]，可以有效消除测量过程中由于太阳辐照度变化带来的测量偏差，目标反射率 $R(\lambda)$ 计算公式为

$$R(\lambda) = C_{\text{panel}}(\lambda) \sum_{i=0}^n \frac{L_{p, \text{base}}(i, \lambda)}{L_{p, \text{uav}}(i, \Delta\lambda + \lambda)} \cdot \frac{L_{t, \text{uav}}(\Delta\lambda + \lambda)}{L_{p, \text{base}}(\lambda)}, \quad (5)$$

式中： L 为辐亮度，下标 base 表示地基观测系统测量，uav 表示机载观测系统测量，p 表示观测目标为参考板，t 表示观测目标为沙漠表面； i 为观测次数； $C_{\text{panel}}(\lambda)$ 为参考板的校正系数，对于理想的漫反射参考板，其来自表面反射的辐亮度与观察角度无关，独立于视角，但是参考板表面的反射比因子与太阳照明角度有关^[17]。图 3 为可见近红外波段参考板的反射比因子与照明角度的关系，数值都来自于最低点观测(观测天顶角为 0°)，由厂家在实验室测得。

$\frac{L_{p, \text{base}}(i, \lambda)}{L_{p, \text{uav}}(i, \Delta\lambda + \lambda)}$ 为双光谱仪之间的传递函数(光

谱仪的归一化)， $L_{p, \text{base}} \setminus L_{p, \text{uav}}$ 分别为在野外环境下，地基和机载光谱仪同时测量同一参考板的辐亮度，求和表示多次测量取平均， $\Delta\lambda$ 表示不同光谱仪在对应波长通道上存在的 1~5 nm 的波长偏移^[15]。 $\frac{L_{t, \text{uav}}(\Delta\lambda + \lambda)}{L_{p, \text{base}}(\lambda)}$ 为所求地表的反射率。

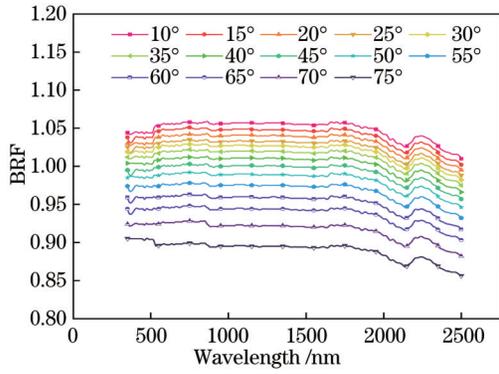


图 3 参考板的校正系数与照明角度关系

Fig. 3 Relationship between calibration coefficients of the reference panel and illumination angles

2.3 漫射光校正模型

当实验的大气条件不允许忽略漫射光影响时,我们需要在目标 BRDF 建模时进行漫射光校正,去除漫反射照明部分,表示为

$$F_{BRDF} = \frac{1}{\pi} F_{BRF} \approx \frac{1}{\pi} F_{HDRF} = \frac{1}{\pi} \frac{d\phi(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r) - d\phi_{diff}(\theta_i, \varphi_i, 2\pi; \theta_r, \varphi_r)}{d\phi_{id}(\theta_i, \varphi_i, 2\pi) - d\phi_{id,diff}(\theta_i, \varphi_i, 2\pi)}, \quad (6)$$

式中: $d\phi_{diff}$ 与 $d\phi_{id,diff}$ 分别表示地表目标和理想参考板对应漫射光通量。因此式(5)修正为

$$R(\lambda) = C_{panel, X}(\lambda) \frac{\sum_{i=0}^n \frac{L_{p, base}(i, \lambda)}{L_{p, uav}(i, \Delta\lambda + \lambda)}}{\frac{L_{t, uav}(\Delta\lambda + \lambda) - L_{dt, base}(\lambda)\sigma(\lambda)}{L_{p, base}(\lambda) - L_{dp, base}(\lambda)}}, \quad (7)$$

式中: $L_{dt, base}$ 、 $L_{dp, base}$ 分别为地基光谱仪垂直观测测量的遮挡地表、遮挡参考板的漫射照明辐亮度; $\sigma(\lambda)$ 为目标 BRDF 的各项异性因子 (ANIF)。它是特定观察方向上的方向反射率 R 与垂直方向上 R_0 的比率, 定义为

$$\sigma(\lambda) = ANIF(\theta_i, \theta_r, \varphi; \lambda) = \frac{R(\theta_i, \theta_r, \varphi; \lambda)}{R_0(\theta_i, \theta_r = 0, \varphi = 0; \lambda)}. \quad (8)$$

图 4 为实验中分别以地表、参考板、遮挡地表、遮挡参考板为观测目标测量的光谱辐亮度, 可以看出其存在差异, 并且可以通过这些目标进行不同条件辐亮度值的计算并为后续分析提供数据。其中: 测量参考板和地表, 得到总辐射下的辐亮度值; 测量遮挡参考板和遮挡地表, 得到环境漫射光照明下的辐亮度值; 将漫反射分量与总辐射值做比值, 可以计算出环境的漫射比, 也为后续漫射光校正测量提供所需数据。

2.4 BRDF 模型拟合

半经验模型由于其未知参数少, 复杂程度比较低, 同时参数具有一定的物理意义, 被广泛地应用于地表 BRDF 模型的拟合中。本文使用 RossThick-LiSparseR 核驱动模型对观测的多角度光谱反射率数

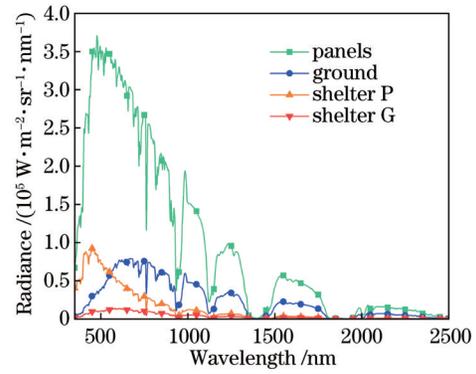


图 4 空-地观测系统同步观测的各目标的光谱辐亮度

Fig. 4 Spectral radiance of each target observed synchronously by the airborne-ground observation system

据进行拟合处理, 核驱动模型的一般表达式^[18]为

$$R(\theta_i, \theta_r, \varphi; \lambda) = f_{iso}(\lambda)k_{iso}(\theta_i, \theta_r, \varphi) + f_{vol}(\lambda)k_{vol}(\theta_i, \theta_r, \varphi) + f_{geo}(\lambda)k_{geo}(\theta_i, \theta_r, \varphi), \quad (9)$$

式中: R 为方向反射率; θ_i 和 θ_r 为太阳天顶角和太阳方位角; φ 为相对方位角。三个核分别描述三种散射类型: k_{iso} 为各向同性核, 其描述各向同性散射, 为常数 1; k_{geo} 为几何光学核, 其只考虑单次散射, 由经典的辐射传输模式推导而来; k_{vol} 为体散射核, 其考虑了表面的阴影与相互遮挡效应的复杂散射情况。 f_{iso} 、 f_{vol} 、 f_{geo} 分别为各向同性散射核、体散射核和几何光学散射核所占的权重, 由最小二乘法拟合得到。

3 BRDF 建模结果分析

3.1 场地 BRDF 测量实验

中国西北的腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、青海的戈壁等地区存在着辐射稳定的场地, 基于 IR-MAD 法选出了 32 个适用于遥感器定标的准不变定标场^[18], 在此基础上, 本文选择位于乌兰布和沙漠中的乌海西准不变场作为实验场地。乌海西场地位于乌海市西部, 地理坐标为 36.67°N、106.65°E, 该地属于中温带干旱气候, 具有太阳光照强、降雨量小、蒸发强烈、晴天数多等特点。实验选择表面平坦, 无植被覆盖, 半径大小为 30 m 的场地为观测目标。不同尺度下观测的乌海沙漠场地地表特征如图 5 所示。

中国气象局国家卫星气象中心实验团队于 2021 年 7 月 28 日至 7 月 30 日在乌海实验场地使用无人机地面同步 BRDF 测量系统进行了为期 3 天的沙漠目标 BRDF 测量实验。测试实验时选择晴朗天气, 其具体的气象条件如光学气溶胶厚度、天空云量在后面小节结果分析处一并展示, 以方便对比分析不同大气条件下 BRDF 建模差异及漫射光校正结果。

3 天实验期间共完成 17 组机载多角度光谱测量实验, 太阳角度覆盖范围为 20.93°~54.83°, 观测条件如表 1 所示, 同时, 地面观测系统记录了实验天光场照明以及漫射光的变化。

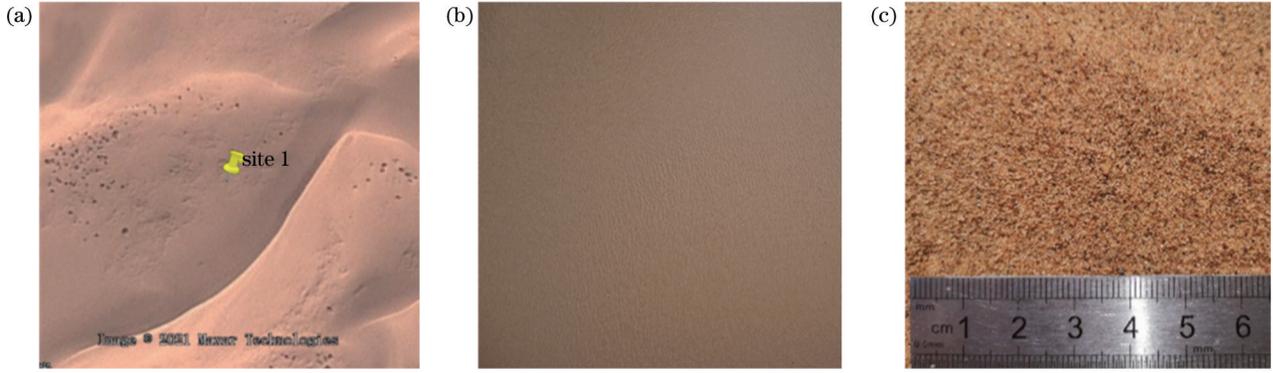


图 5 不同尺度下场地目标表面特征。(a)卫星观测;(b)无人机观测;(c)地面观测

Fig. 5 Surface features of field targets at different scales. (a) Satellite observation; (b) UAV observation; (c) ground observation

表 1 机载 BRDF 测量系统观测信息

Table 1 Observation data of the airborne BRDF measurement system

Date	Time	Solar zenith / (°)	Solar azimuth / (°)
2021-07-28	9:50	42.85	105.82
	11:00	31.97	122.05
	13:00	20.72	183.33
	14:40	30.90	235.73
	15:40	43.50	254.92
	16:40	53.43	264.88
2021-07-29	9:20	49.34	99.32
	10:40	36.09	1115.39
	13:00	20.93	179.45
	14:40	30.53	234.24
	15:40	42.03	252.74
2021-07-30	16:50	54.83	265.77
	9:20	50.26	98.82
	10:40	36.91	114.74
	13:00	21.17	178.95
	14:40	29.32	230.76
15:40	41.81	252.00	

图 6 为一个测量架次内机载光谱仪单个波段观测的各测量点位的天顶角、方位角、反射率。图 7 为地基光谱仪连续测量的照明光场的变化,可见太阳辐照度随着太阳高度角先增后减,在 13:30 达到最大,且由于正午环境直射光分量的增大,漫总比达到最小。

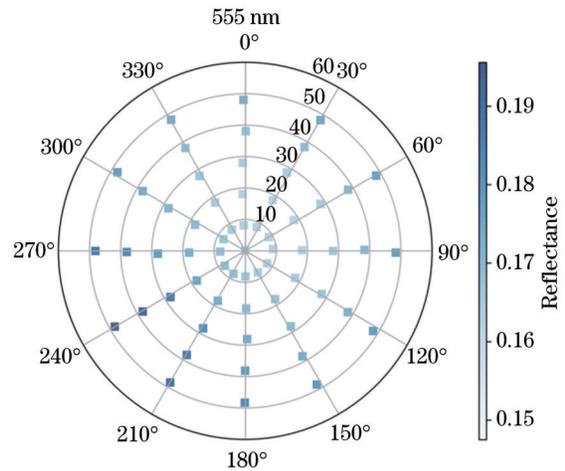


图 6 机载光谱仪测量的目标在 555 nm 波段反射率的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of target reflectance in the 555 nm band measured by the airborne spectrometer

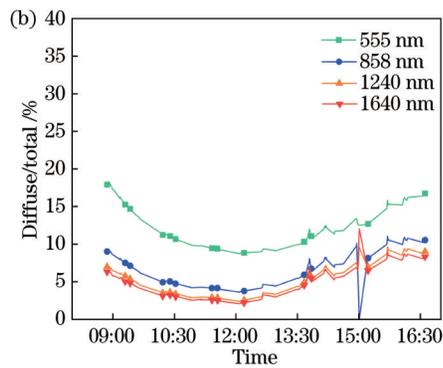
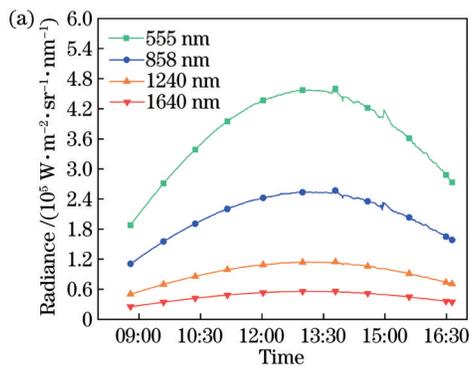


图 7 地基光谱仪测量数据。(a)全天太阳辐照度的变化;(b)全天漫总比的变化

Fig. 7 Measurement data of the ground-based spectrometer. (a) Variation of solar irradiance throughout the day; (b) variation of diffuse-to-total irradiance ratio throughout the day

3.2 数据处理

实验表明,虽然空地同步观测使用的两台光谱仪型号参数均相同,但是观测数据存在一定的波长偏移。由式(5)计算地表多角度反射率,需要先考虑双光谱仪之间的存在的波长偏移以避免仪器自身带来的测量误差。通过计算平移波长后的两光谱间的光谱角,光谱角越小表示两光谱越相似,故光谱角最小时对应的偏移量为最佳偏移量。

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{a}}{\|\mathbf{a}\|}\right)^T \left(\frac{\mathbf{X}}{\|\mathbf{X}\|}\right) = \arccos(\mathbf{a}_u^T \cdot \mathbf{X}_u), \quad (10)$$

式中: θ 为光谱角; \mathbf{a} 和 \mathbf{X} 为光谱向量。

考虑到RS-8800地物光谱仪存在着三个光谱范围与光谱分辨率不同的传感器,分三段计算光谱角。如图8和表2所示,350~1000 nm、1000~1900 nm、1900~2500 nm范围的波长偏移量分比为1 nm、-5 nm、0 nm。

图9对比了考虑波长偏移前后反射率的计算结果。可以看出,光谱仪之间的小波长偏移导致非物理尖峰和伪吸收特征的存在,进行波长偏移校正能够消除这种尖峰和伪吸收特征,且光谱反射率更加平滑。

由于一个架次的测量时间约为15 min,在此期间除了太阳照明发生改变,场地大气环境也会发生改变,从而导致照明光场的变化,故在机载光谱仪测量地表辐亮度的同时,使用地基光谱仪持续测量参考板来跟踪光场的时间变化。图10显示了7月28日9:50架次测量的61条多角度地表反射率光谱,其中去除了以

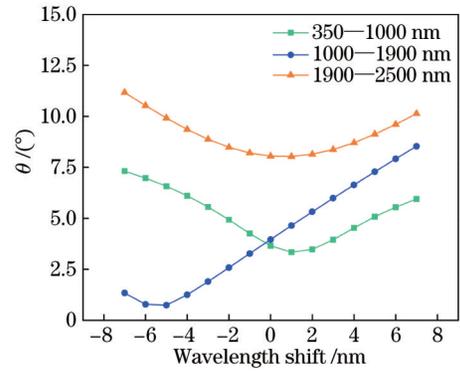


图8 机载光谱仪与地基光谱仪之间光谱角与波长偏移量关系
Fig. 8 Relationship between spectral angle and wavelength shift between airborne and ground-based spectrometers

表2 不同波段的波长偏移量

Table 2 Wavelength shifts at different wavelengths

Sensor	Spectral range / nm	Wavelength shift / nm
512-element Silicon Linear	350-1000	1
Enhanced 256-element Linear Array	1000-1900	-5
Enhanced 256-element Linear Array	1900-2500	0

1.39 μm 和 1.89 μm 为中心的大气吸收波段。图10(a)、(b)分别为使用机载光谱仪和使用空地双光谱仪同步测量计算的反射率光谱,图10(c)为555 nm波段处61个点位反射率分布。图10(c)表明,随着测量时间的增长,太阳辐射增强导致后续点位测量的反射率被高估,而双光谱仪法在计算反射率时可以对此进行校正。

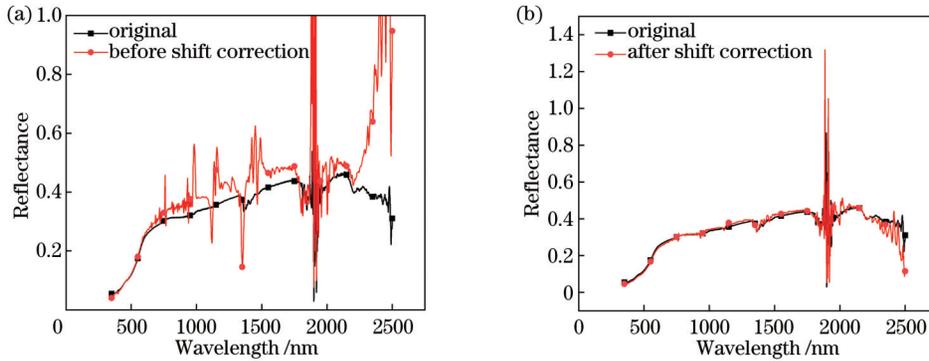


图9 波长偏移校正前后计算的地表反射率。(a) 波长偏移校正前;(b) 波长偏移校正后

Fig. 9 Surface reflectance calculated before and after wavelength shift correction. (a) Before wavelength shift correction; (b) after wavelength shift correction

3.3 场地BRDF建模

整理所有观测架次的数据并代入式(9)的模型拟合计算模型系数,表3为在469 nm、555 nm、645 nm、856 nm、1240 nm、1640 nm波段,三天测量数据拟合的BRDF模型参数。在30°太阳天顶角的条件下,计算在0°~50°观测天顶角和0°~360°相对方位角

的空间范围内,使用反演的模型参数计算的沙漠场地方向性反射分布的空间分布。为了避免不同波段光谱反射亮度差异的影响,需要统一计算各向异性因子。场地在特定波段的ANIF空间分布计算结果如图11所示,其中,极径表示天顶角,极角表示方位角。

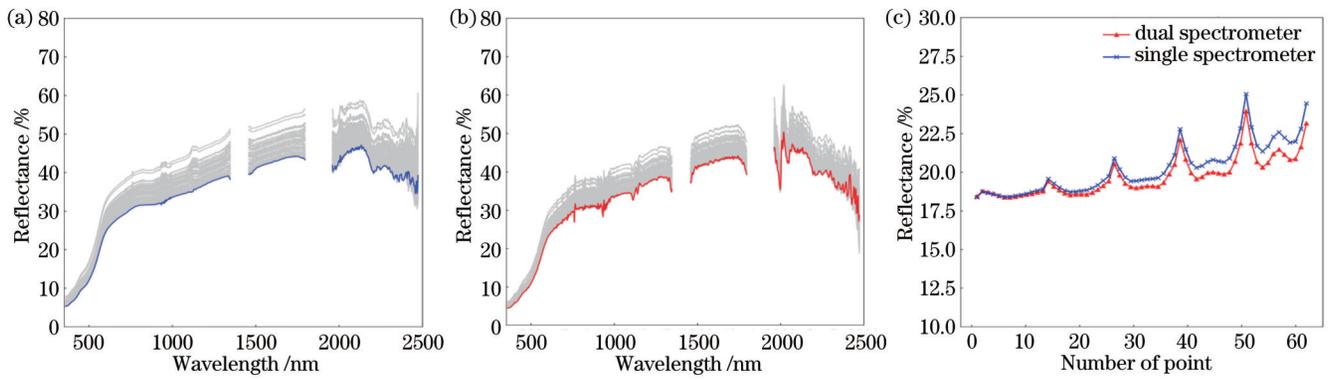


图 10 单/双光谱仪法计算地表反射率对比。(a)单光谱仪计算;(b)双光谱仪计算;(c)在 555 nm 波段 61 个点点的反射率

Fig. 10 Comparison of surface reflectance calculated by single and dual spectrometer method. (a) Calculation with a single spectrometer; (b) calculation with a dual spectrometer; (c) reflectance at 61 points in the 555 nm band

表 3 三天数据拟合的 BRDF 模型系数

Table 3 BRDF model coefficients for fitting three-day data

Band /nm	2021-07-28			2021-07-29			2021-07-30		
	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}
469	0.082	0.085	-0.011	0.094	0.063	-0.002	0.094	0.051	-0.001
555	0.154	0.148	-0.021	0.172	0.097	-0.002	0.171	0.085	-0.002
645	0.228	0.209	-0.030	0.257	0.119	-0.005	0.260	0.095	0
858	0.281	0.236	-0.033	0.312	0.125	-0.004	0.316	0.108	-0.002
1240	0.355	0.236	-0.029	0.372	0.145	-0.010	0.380	0.143	-0.007
1640	0.409	0.236	-0.027	0.443	0.116	-0.007	0.437	0.133	-0.003

3.4 漫射光校正 BRDF 结果

3.4.1 漫射光计算

当天空非常晴朗,几乎没有漫射散射(低气溶胶光学厚度,没有云)时,可以忽略漫射光影响,近似认为 HDRF 约等于 BRDF,但当大气条件较差,光学气溶胶厚度较大,且天空有云干扰时,照明中漫射光占比增加,在计算 BRDF 时不可忽略漫射光的影响。图 12 为实验中由 CW-193 太阳光度计测量数据反演得到的实验天的光学气溶胶厚度(AOD),以及由全天空成像仪记录的实验天的天空云量,表征为不同等级的量化值。可见,相对于 7 月 29 日和 7 月 30 日较为稳定 AOD、晴朗无云的大气条件,7 月 28 日 10 点至 12 点时间段出现较大的 AOD 波动,且全天出现不同程度的起云现象。

图 13 为三天中机载观测系统测量时地基观测系统测得的天空漫射与总辐射之比。其中在 1.89 μm 和 2.5 μm 附近数据出现较大波动,因为以 1.89 μm 为中心存在较宽的水汽吸收窗口,该波段光谱仪获取的辐射量极其微小,即使在天空相对晴朗的日子里,也会出现这种情况,这些波段中可用于计算的数据量非常少,使得通过双光谱仪计算反射率产生一定数值量的不稳定。另外在光谱仪的可测波长末端(2.4~2.5 μm),由于仪器自身的原因,这一部分数据的信噪比较低,数据质量相对较差。对这些具有较大波动的数据在后面可以不参与分析。可以看出,天空漫射与总辐射之比随

波长的增加大致呈下降趋势,早、晚架次的漫总比较高,其他时刻较为接近,这因为当 AOD 比较稳定时,早晚太阳的高度角很小,大气斜程大,太阳直射光衰减非常厉害,而天空漫射光显得非常突出。即使在晴天,在可见近红外区域,漫射光也有近 5%~10% 的占比。

3.4.2 漫射光校正 BRDF 结果分析

按照式(7)对数据进行漫射光校正,并重新拟合 Ross-Li 模型,得到的 BRDF 模型系数如表 4 所示。

在观测天顶角 50°内,太阳天顶角 50°内,相对方位角 0°~180°内,随机选取 180 组角度,对不同天测量所得 BRDF 模型各波段的模拟反射率值进行对比,得到相对偏差 B 。以 7 月 30 日模型为参考,对比 7 月 28 日和 7 月 29 日与其在漫射光校正前后的模拟反射率相对偏差以及标准差(STD),如图 14 和表 5 所示,图 14 中箱体代表数据的四分位数间距(IQR),箱体外的竖线代表为 1.5 倍的 IQR 区间,横线代表数据的上下限,实线为中位值,虚线为平均值。

$$B = \frac{|R_2(\theta_i, \theta_r, \varphi) - R_1(\theta_i, \theta_r, \varphi)|}{R_1(\theta_i, \theta_r, \varphi)} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: R_1 为 7 月 30 日反射率拟合值; R_2 为 7 月 28 日、7 月 29 日反射率拟合值。

从图 14(a)和(c)可以看出,不同天 BRDF 模型模拟反射率值在可见光波段的相对偏差要大于近红外波段,这是由于漫总比在可见光波段的占比较高。其中

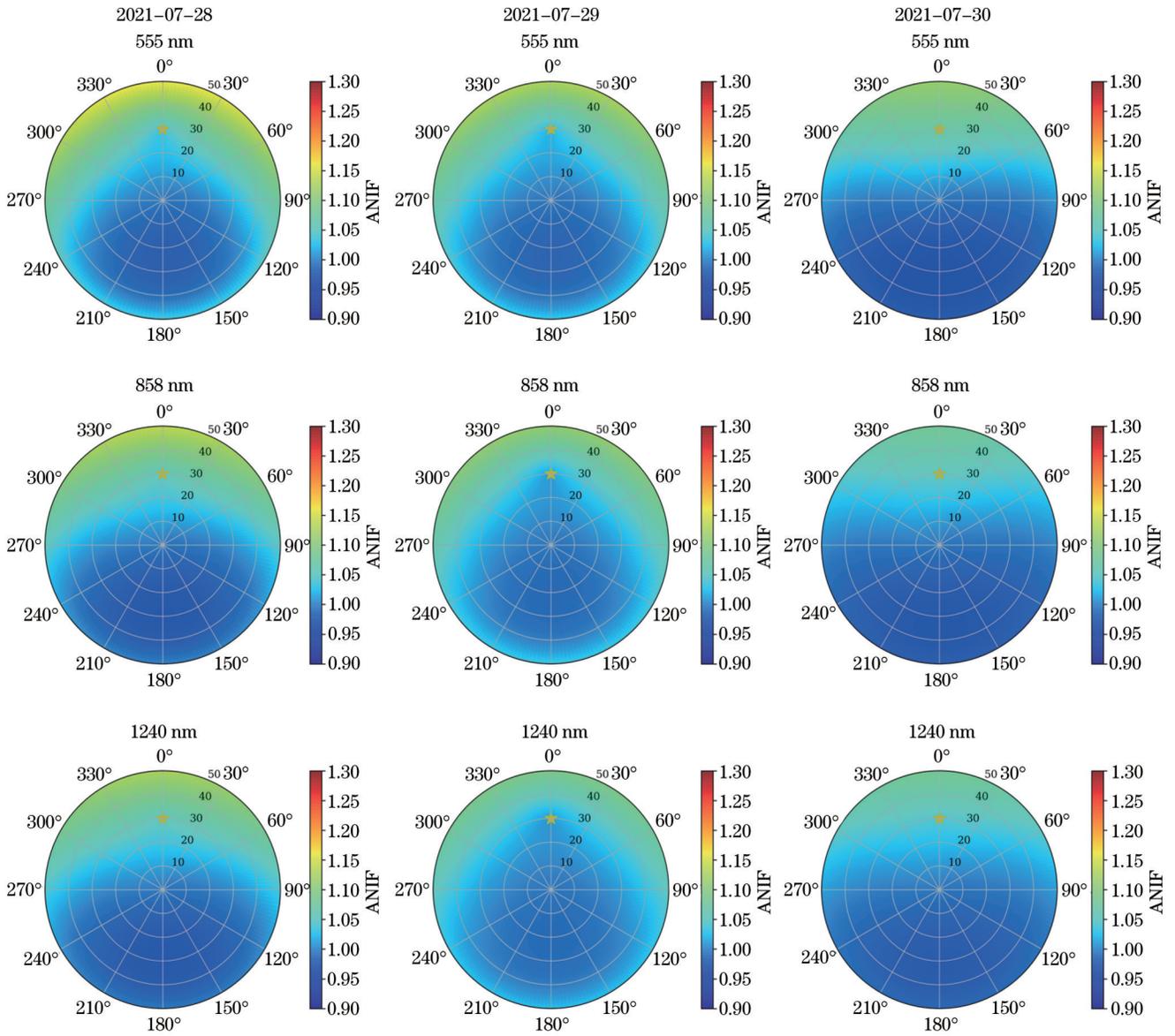


图 11 555 nm、858 nm、1240 nm 波段的 ANIF 空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution maps of ANIF at the 555 nm, 858 nm, and 1240 nm bands

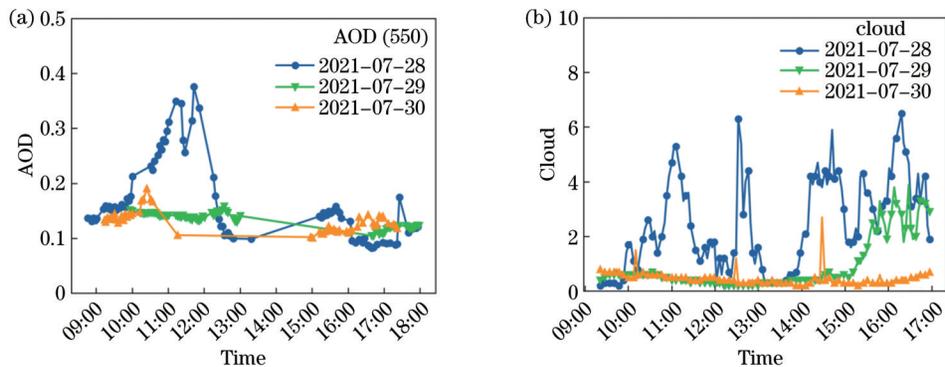


图 12 测量期间的大气环境变化。(a)AOD随时间变化;(b)云量随时间变化

Fig. 12 Changes in atmospheric environment during the measurement period. (a) Change of AOD with time;(b) change of cloud with time

7月28日与30日均值偏差最大达到了8.135%，说明AOD波动与云的增加对BRDF建模的准确性造成了

影响。从图14(b)可以看出,进行漫射光校正后,7月28日与30日的均值偏差均有下降,除了469 nm和

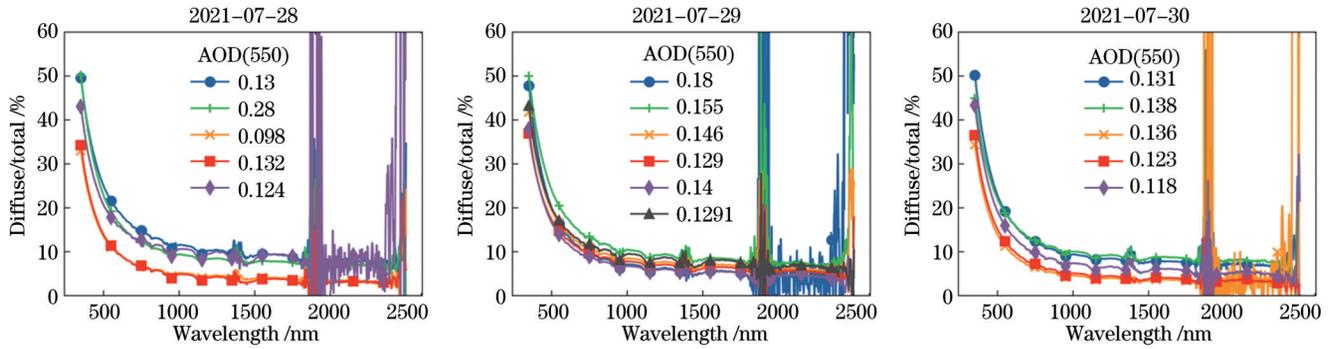


图 13 各测量架次时的漫总比及对应时刻 AOD

Fig. 13 Total diffuse ratio and AOD at each measurement flight

表 4 漫射光校正后的 BRDF 模型系数

Table 4 Model coefficients after diffuse light correction

Band /nm	2021-07-28			2021-07-29			2021-07-30		
	f_{iso}	f_{vol}	f_{geo}	f_{iso}	f_{vol}	f_{iso}	f_{iso}	f_{vol}	f_{iso}
469	0.084	0.131	-0.022	0.089	0.101	-0.016	0.091	0.083	-0.011
555	0.151	0.217	-0.040	0.156	0.174	-0.032	0.165	0.135	-0.018
645	0.233	0.280	-0.051	0.241	0.239	-0.042	0.245	0.187	-0.031
858	0.293	0.354	-0.062	0.303	0.274	-0.050	0.307	0.226	-0.037
1240	0.359	0.379	-0.069	0.371	0.289	-0.053	0.371	0.274	-0.041
1640	0.426	0.249	-0.037	0.426	0.283	-0.051	0.426	0.249	-0.038

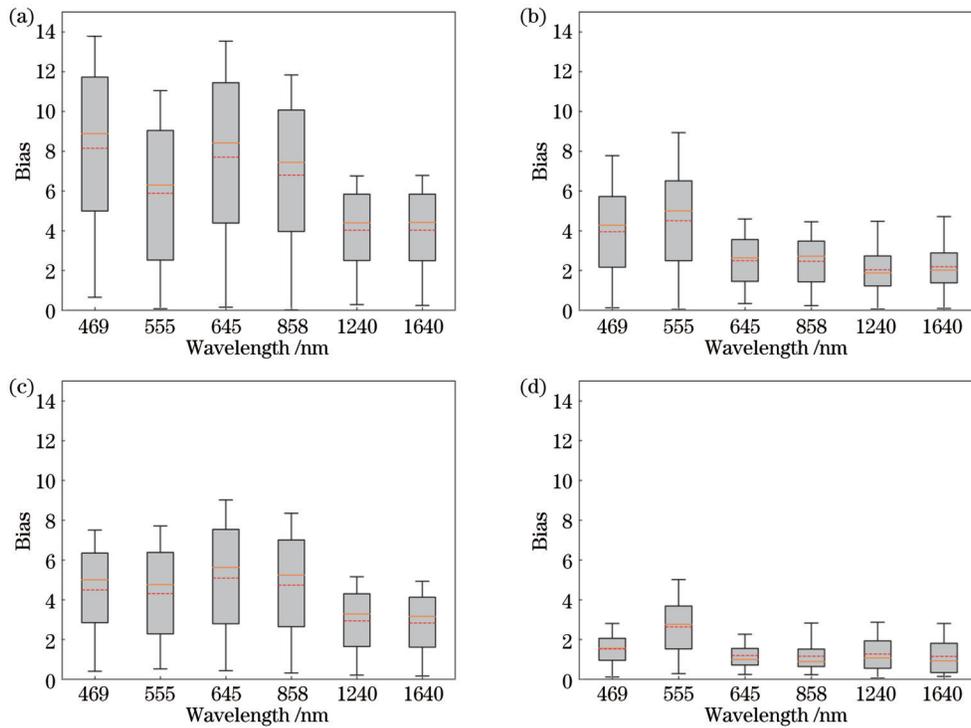


图 14 不同日期测量所得 BRDF 模型各波段的模拟反射率值相对偏差。(a)(b)漫射光校正前后 7 月 28 日与 7 月 30 日模型偏差;(c)(d)漫射光校正前后 7 月 29 日与 7 月 30 日模型偏差

Fig. 14 Relative bias of simulated reflectance values for different bands of BRDF models obtained on different days. (a) (b) Model bias on July 28th and July 30th before and after diffuse light correction; (c) (d) model bias on July 29th and July 30th before and after diffuse light correction

555 nm 波段,其他波段的相对偏差均值都在 3% 以内。从图 14(d)可以看出,进行漫射光校正后,7月29日与30日的均值偏差下降明显,除了555 nm波段,其他波段的相对偏差均值都在1%以内。从整体上来看,经漫射光校正后的BRDF模型各波段的相对偏差均值都在5%以内,相对偏差标准差在3%以内,说明经过漫射光校正后不同天的BRDF模型更加接近,符合目标的BRDF

特征只反映目标的二向反射特征,与测量环境无关。

图 15 为漫射光校正后 3 天 BRDF 模型的空间分布,结果表明,在漫射光校正之后,当太阳天顶角为 30° 时,不同天模型的 ANIF 在观测天顶角为 0°~40° 之间的空间分布更加相似。然而,在观测天顶角为 40°~50° 时,7月28日的 ANIF 值更大,而7月30日的 ANIF 值最小。

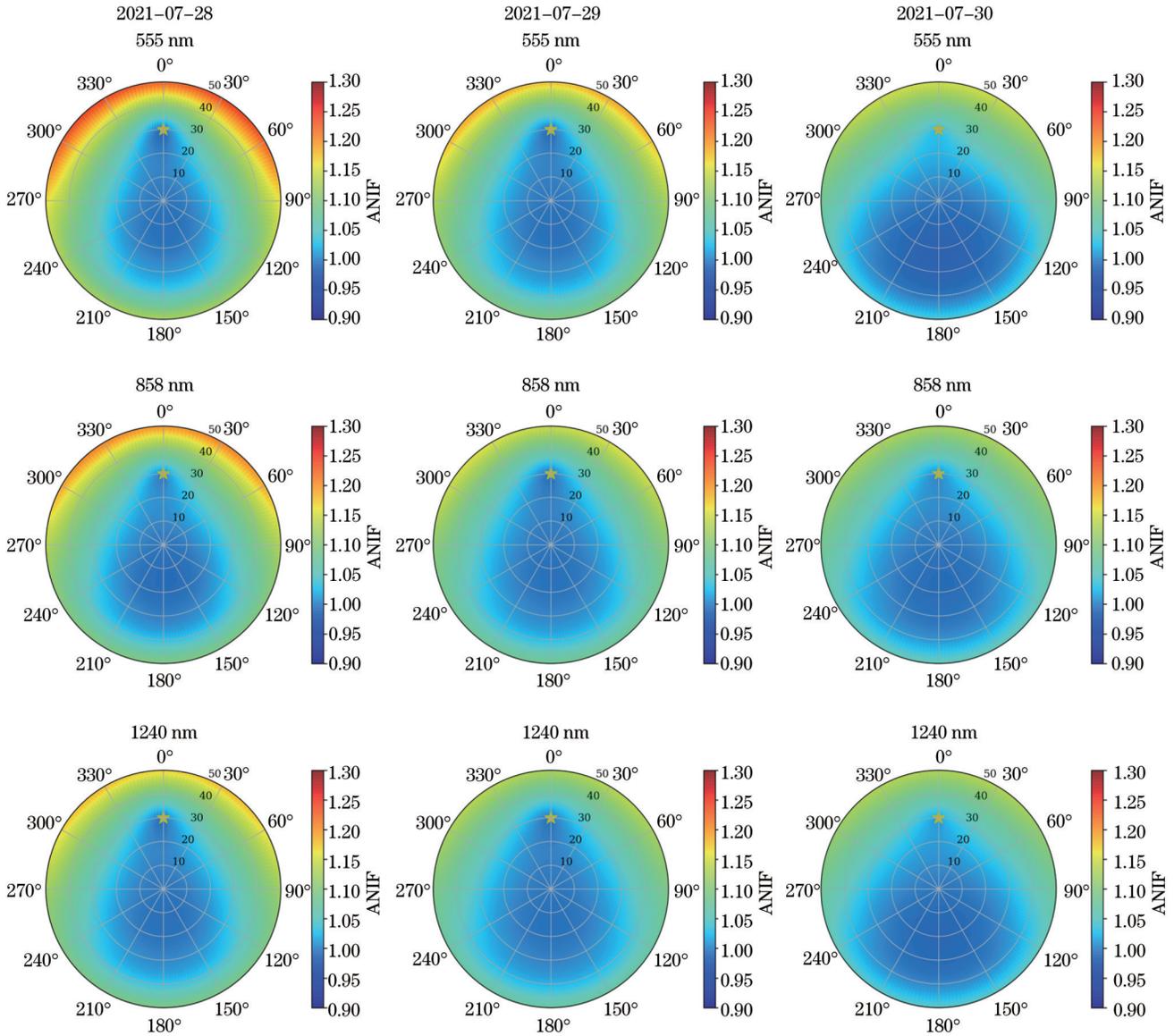


图 15 漫射光校正后 555 nm、858 nm、1240 nm 波段的 ANIF 空间分布图

Fig. 15 Spatial distribution maps of ANIF at the 555 nm, 858 nm, and 1240 nm bands after diffuse light correction

综合而言,利用双光谱仪在空地同步测量模式下,对同一场地、不同日期的多角度光谱进行数据测量能够拟合 BRDF 模型并进行漫射光校正。实验表明不同的大气条件下场地的 BRDF 建模存在差异,而经过漫射光校正后不同天的模型更加接近,验证了本文所提方法的有效性和可靠性。

4 结 论

本文提出一种基于地-空双光谱仪联合观测加漫

射板观测并消除漫射光影响的 BRDF 建模方法,对西北准不变定标场的 BRDF 特性进行测量,使用无人机搭载光谱仪进行场地的低空测量,在不破坏场地的前提下能够更加便利地获取多角度光谱数据,同时,开展地基光谱仪的同步测量,能够连续记录照明光场的变化,消除了测量期间由于照明环境的变化而带来光谱反射率计算时的偏差。基于 Ross-Li 核驱动半经验模型,构建了不同大气环境下的场地 BRDF 模型,并分析了在野外环境下,不同大气条件对 BRDF 反演的影响,

表 5 不同日期测量所得 BRDF 模型各波段的模拟反射率值相对偏差及其标准差统计分析表

Table 5 Statistical analysis of the relative bias and standard deviation of simulated reflectance values for different bands of BRDF models obtained on different days

Band /nm	Diffuse-correction between July 30th & July 28th (no-correction)		Diffuse-correction between July 30th & July 29th (no-correction)	
	Average relative bias /%	STD of relative bias /%	Average relative bias /%	STD of relative bias /%
469	3.953(8.135)	2.288(4.180)	1.528(4.493)	0.807(2.241)
555	4.509(5.877)	2.626(3.595)	2.632(4.304)	1.418(2.442)
645	2.496(7.691)	1.323(4.318)	1.196(5.088)	0.777(2.861)
858	2.456(6.787)	1.306(3.773)	1.161(4.736)	0.788(2.647)
1240	2.038(4.031)	1.212(2.067)	1.271(2.933)	0.885(1.628)
1640	2.183(4.030)	1.268(2.084)	1.144(2.822)	0.900(1.555)

最后使用地基光谱仪在漫射照明下的测量数据,对 BRDF 模型进行了漫射光校正。经漫射光校正后的 BRDF 模型各波段的相对偏差均值都在 5% 以内,相对偏差标准差在 3% 以内,不同天的 BRDF 模型更加接近,有效消除目标 BRDF 建模在漫射光照射下的干扰,提高 BRDF 建模的准确性。未来可在多种地表类型进行场地 BRDF 测量实验以提高模型的适用性,并通过在辐射定标中的应用来验证模型的精度。

参 考 文 献

- [1] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M]. New York: National Bureau of Standards, 1977.
- [2] Tornow F, Domenech C, Fischer J. On the use of geophysical parameters for the top-of-atmosphere shortwave clear-sky radiance-to-flux conversion in EarthCARE[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36(4): 717-732.
- [3] Zhang L, Zhang P, Hu X Q, et al. Radiometric cross-calibration for multiple sensors with the moon as an intermediate reference [J]. Journal of Meteorological Research, 2019, 33(5): 925-933.
- [4] 豆新格, 潘军, 高海亮, 等. 敦煌辐射校正场双向反射分布函数模型构建及应用分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1628005.
- Dou X G, Pan J, Gao H L, et al. Construction and application analysis of bidirectional reflection distribution function model of Dunhuang radiation correction field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1628005.
- [5] 周为伟, 胡秀清, 杨磊库. 基于 Himawari-8 卫星成像仪的深对流云 BRDF 特性建模[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1228007.
- Zhou W W, Hu X Q, Yang L K. Modeling of BRDF characteristics of deep convective cloud based on Himawari-8 satellite imager[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1228007.
- [6] 李卓然, 李雨霄, 刘子龙. 近红外波段高精度 BRDF 测量系统研究[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1212002.
- Li Z R, Li Y X, Liu Z L. Research on high precision BRDF measurement system in near infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1212002.
- [7] Langovoy M. Machine learning and statistical analysis for BRDF data from computer graphics and multidimensional reflectometry [J]. IAENG International Journal of Computer Science, 2015, 42(1): 23-30.
- [8] 陈川, 易维宁, 崔文煜, 等. 大气散射对地表双向反射分布函数反演的影响与修正[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 346-352.
- Chen C, Yi W N, Cui W Y, et al. Influence and correction of BRDF retrieval of surface by atmospheric scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 346-352.
- [9] Hakala T, Suomalainen J, Peltoniemi J I. Acquisition of bidirectional reflectance factor dataset using a micro unmanned aerial vehicle and a consumer camera[J]. Remote Sensing, 2010, 2(3): 819-832.
- [10] Doctor K Z, Bachmann C M, Gray D J, et al. Wavelength dependence of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of beach sands[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F243-F255.
- [11] Li L Y, Mu X H, Qi J B, et al. Characterizing reflectance anisotropy of background soil in open-canopy plantations using UAV-based multiangular images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 177: 263-278.
- [12] Roosjen P P, Suomalainen J M, Bartholomeus H M, et al. Hyperspectral reflectance anisotropy measurements using a pushbroom spectrometer on an unmanned aerial vehicle—results for barley, winter wheat, and potato[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11): 909-925.
- [13] Burkart A, Aasen H, Alonso L, et al. Angular dependency of hyperspectral measurements over wheat characterized by a novel UAV based goniometer[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 725-746.
- [14] 陶炳成, 胡秀清, 杨磊库, 等. 无人机平台的沙漠场地 BRDF 特征观测方法及建模[J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 1964-1977.
- Tao B C, Hu X Q, Yang L K, et al. BRDF feature observation method and modeling of desert site based on UAV platform[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(9): 1964-1977.
- [15] Bachmann C M, Montes M J, Parrish C E, et al. A dual-spectrometer approach to reflectance measurements under sub-optimal sky conditions[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8959-8973.
- [16] Milton E J, Schaepman M E, Anderson K, et al. Progress in field spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113: S92-S109.
- [17] Lamarr J H. Diffuse light correction for field reflectance measurements[D]. Arizona: The University of Arizona, 2001.
- [18] 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.

Calibration Site BRDF Modeling Method Based on Ground and Low-Altitude UAV Joint Observation

He Yuqing^{1*}, Hu Wenjie^{1**}, Hu Xiuqing^{2,3***}, Zhu Jibiao², He Xingwei^{2,3}, Jin Weiqi¹

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

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

³Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China

Abstract

Objective The bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is a crucial parameter for satellite sensors to conduct vicarious calibration of pseudo-invariant calibration sites (PICS). Low-altitude self-rotating unmanned aerial vehicles (UAVs) have become a convenient and efficient approach for acquiring BRDF data of these sites. When the surface's directional reflection characteristics in outdoor conditions are measured, it is not possible to control the illuminance solely in the non-incident direction. The target is illuminated by direct sunlight and atmospheric scattered light, introducing a certain level of systematic error in BRDF measurement. Conducting *in situ* measurements through UAVs with multi-angle observation and spectral data shows significant potential for building more accurate BRDF models for PICS. We propose a BRDF modeling method based on joint observations of ground-based and aerial dual spectrometers, and diffuse plate observations to eliminate the influence of diffuse light. The compact and lightweight drone platform, which is not limited by terrain, makes it suitable for measuring various complex terrains. Simultaneously, the ground-based spectrometer can continuously measure changes in the illumination field. The combined observations of the ground-based and low-altitude UAV instruments can eliminate the interference caused by diffuse light irradiation in BRDF modeling and substantially improve accuracy.

Methods The synchronized BRDF observation system includes an airborne spectral measurement system, a ground-based spectrometer measurement system, a solar radiometer, and a whole sky imager. The low-altitude UAV carries a spectrometer to obtain site spectral data at multiple angles within a 50 m radius hemisphere. Meanwhile, the ground-based spectrometer is employed to synchronously measure the diffuse reference panel, continuously recording changes in the illumination field and site spectral data under diffuse illumination. The radiative luminance is measured by a ground-based spectrometer, and the BRDF is calculated by dividing the bidirectional reflectance factor (BRF) by π . In outdoor measurement environments where the lighting conditions are not unidirectional, the hemisphere-directional reflectance factor (HDRF) is introduced as a substitute for calculation. When the sky is clear and there is almost no diffuse scattering (low aerosol optical thickness, without clouds), the influence of diffuse light can be ignored and HDRF is approximately equal to BRF. The target and reference panel's measured radiance data from the UAV and ground-based spectrometers are combined with the observation geometry between the sun and the viewing angles to calculate the site's multi-angle reflectance. By synchronously measuring the radiance of the target surface and the reference panel with airborne and ground-based spectrometers and considering the observation geometry between the sun and the viewing angles, the ratio of the two can be calculated. As a result, the site's multi-angle reflectance can be obtained to eliminate measurement biases caused by variations in solar irradiance during the measurement. When affected by diffuse light, the target reflectance is corrected by subtracting the corresponding diffuse light luminance from the surface target and the ideal reference panel to achieve diffuse light correction. Based on the Ross-Li kernel-driven semi-empirical model, the multi-angle reflectance data are fitted by the least squares method to obtain the optimal site BRDF model.

Results and Discussions The Wuhai West Desert in the Ulanbuh Desert is selected as the PICS target for the BRDF measurement experiment using the UAV-ground synchronized system. A total of 17 sets of airborne multi-angle spectral measurement data in three consecutive days are adopted for BRDF modeling analysis. Before calculating the surface multi-angle reflectance, it is necessary to calculate the wavelength shift between the two spectrometers to avoid measurement errors caused by the instruments themselves. The wavelength shift result is the offset corresponding to the minimum spectral angle between the two spectrometers after wavelength translation and is also employed for data preprocessing. The data from all observation sessions are organized and substituted into the model fitting calculation of Eq. (9) to obtain the model coefficients. By fitting the three-day measurement data, the BRDF model parameters at 469 nm, 555 nm,

645 nm, 856 nm, 1240 nm, and 1640 nm are obtained, as shown in Table 3. Due to the differences in atmospheric conditions on different dates during the experiment, diffuse light correction is performed, and the obtained BRDF model coefficients are shown in Table 4. The experimental result proves that the mean relative deviation of the BRDF model at each wavelength band after diffuse light correction is within 5%, and the relative standard deviation is within 3%. Finally, the interference of the field BRDF modeling under diffuse light illumination is eliminated and the modeling accuracy is improved.

Conclusions We propose a method for BRDF modeling based on ground-UAV dual spectrometer joint observation. When diffuse panel observation is utilized, the diffuse light influence can be eliminated. It measures the BRDF characteristics of the selected PICS and leverages a spectrometer carried by a UAV to obtain multi-angle spectral data from low-altitude measurements of the site. Simultaneously, ground-based spectrometer synchronous measurements are conducted to continuously record changes in the illumination field and eliminate deviations in spectral reflectance calculations caused by the lighting environment changes during the measurement. Based on the Ross-Li kernel-driven semi-empirical model, BRDF models for different atmospheric environments are built, and the effects of different atmospheric conditions on BRDF inversion in outdoor environments are analyzed. Through measurement data from the ground-based spectrometer under diffuse illumination, the BRDF model is corrected for diffuse light. Experimental results show that the proposed method can eliminate the interference of diffuse light illumination in the BRDF modeling of the PICS and improve accuracy.

Key words bidirectional reflectance distribution function; unmanned aerial vehicle; dual-spectrometer; bidirectional reflectance distribution function modeling; diffuse light correction