

中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区光环境变化研究

李元 张勇 胡丽琴 陆其峰 卢乃锰

Investigation of optical environment changes in the Dunhuang gobi site of the Chinese radiometric calibration sites

LI Yuan, ZHANG Yong, HU Li-qin, LU Qi-feng, LU Nai-meng

引用本文:

李元, 张勇, 胡丽琴, 陆其峰, 卢乃锰. 中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区光环境变化研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1231-1242. doi: 10.37188/CO.2020-0129

LI Yuan, ZHANG Yong, HU Li-qin, LU Qi-feng, LU Nai-meng. Investigation of optical environment changes in the Dunhuang gobi site of the Chinese radiometric calibration sites[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1231-1242. doi: 10.37188/CO.2020-0129

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system

中国光学. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

新型有机晶体及超宽带太赫兹辐射源研究进展

Advances in organic nonlinear crystals and ultra-wideband terahertz radiation sources

中国光学. 2019, 12(3): 535 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0535>

双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学. 2017, 10(6): 699 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699>

太阳辐射计的衍射效应修正

Diffraction effect correction of solar radiometer

中国光学. 2018, 11(5): 851 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0851>

大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展

Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface

中国光学. 2019, 12(2): 214 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0214>

太赫兹波三维成像技术研究进展

Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques

中国光学. 2019, 12(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0001>

文章编号 2095-1531(2021)05-1231-12

中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区 光环境变化研究

李元, 张勇*, 胡丽琴, 陆其峰, 卢乃锰

(中国气象局国家卫星气象中心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:为有效评估集热塔散射辐射对敦煌场区光环境的影响程度, 本文采用 Monte Carlo 三维辐射传输模型模拟与 CE318 多通道光度计等高线实测分析相结合的定量分析方法, 以解决散射辐射交融于背景辐射中难以定量评估的问题。通过使用新型的 ASC200 云量自动观测仪, 提高晴空辨识精度。通过开发 CE318 四象限定位修正算法, 有效提高观测数据质量。2020 年 1~3 月收集到的有效数据显示除了 550 nm 通道, 集热塔未对天空漫射辐射产生明显影响。对于 500 nm 通道, 在有效数据对应的观测几何下(距离 0.87~3.07 km, 观测天顶角为 77.30°~51.32°), 集热塔吸热器对天空漫射辐射的影响不超过 0.93%。与模型模拟结果相结合进行分析, 得出如下结论: 当距离电站 2 km 时大电站散射辐射带来的天空漫射辐射相对变化 < 1.62%; 当与电站距离 ≥ 3 km 时相对变化 < 0.93%。本项研究成果对利用敦煌场开展遥感定量化应用、准确评估发电站引进的不确定度因素具有积极意义。

关键词:中国遥感卫星辐射校正场; 敦煌; 熔盐塔式光热发电站; 天空漫射辐射; 三维辐射传输模拟; 云量自动观测
中图分类号: O432.1; P422.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2020-0129

Investigation of optical environment changes in the Dunhuang gobi site of the Chinese radiometric calibration sites

LI Yuan, ZHANG Yong*, HU Li-qin, LU Qi-feng, LU Nai-meng

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

* Corresponding author, E-mail: zhangyong@cma.gov.cn

Abstract: In order to effectively evaluate the influence of scattered radiation of the heat collection tower on the optical environment of the Dunhuang Gobi Site of the Chinese Radiometric Calibration Sites (CRCS), the Monte Carlo three-dimensional radiation transmission model simulation combined with in situ CE318 multi-channel photometer almucantar measurements was applied to solve the problem that it is difficult to quantitatively evaluate the scattered radiation mixed with the background radiation. By measuring the data with a new cloud cover automatic observing instrument ASC200, the accuracy of clear sky measurements improved,

收稿日期: 2021-06-25; 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 国家重点研发计划课题(No. 2018YFB0504601); 国家自然科学基金委员会面上项目(No. 41271373); 民用航天“十三五”技术预先研究项目(No. D040401); 上海航天科技创新基金资助项目(No. SAST2019-044)

Supported by National Key Research and Development Project (No. 2018YFB0504601); National Natural Science Foundation of China General Project (No. 41271373); Civil Aerospace “Thirteenth Five-Year” Technology Pre-research Project (No. D040401); Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Fund Project (No. SAST2019-044)

and the development of the CE318 four-quadrant location correction algorithm effectively increased the amount of valid data that meets our threshold requirements. The effective data collected from January to March 2020 shows that the molten salt tower Concentrating Solar Power (CSP) project has no significant impact on the sky diffuse radiation outside the 550nm channel. In the 500 nm channel, under the geometric parameters corresponding to the valid data (distance 0.87–3.07 km, observation zenith angle 77.30–51.32°), the impact of the molten salt tower heat absorber on diffuse sky radiation does not exceed 0.93%. Combined with the analysis of the model simulation results, it can be concluded that the relative change of the sky diffuse radiation caused by the scattered radiation of the large power station is less than 1.62% at 2 km away, and the relative change is less than 0.93% when it is at least 3 km away. The research results have positive significance for the use of Dunhuang Site to conduct quantitative applications in remote sensing and the accurate evaluation of the uncertainties introduced by power stations.

Key words: Chinese radiometric calibration sites; Dunhuang site; molten salt tower solar power station; diffuse radiation; three-dimensional radiation transmission simulation; cloud cover automatic observation

1 引 言

自 20 世纪 80 年代以来, 卫星遥感逐渐向定量化方向发展。卫星图像不只用于目视解译, 还用来定量反演大气、陆地和海洋等地球物理参数。为了确保在轨卫星观测的准确性, 各航天大国着手选择辐射特性均匀稳定的地面目标, 将其作为“标准”, 通过卫星过境时的地面同步观测和辐射传输规律, 对在轨卫星传感器进行标定, 从而实现辐射校正。辐射校正已经成为遥感领域的重大基础研究课题, 得到了国际遥感界的高度重视。我国在 20 世纪 90 年代启动了“中国遥感卫星辐射校正场”项目的科研和建设工作, 开启了我国遥感卫星定量化技术系统性攻关。中国遥感卫星辐射校正技术以辐射校正场为基础, 围绕我国全系列国产遥感卫星发展和定量化应用需求, 在辐射校正技术指标体系、理论与方法、标准与测量技术、观测与系统集成技术等方面开展研究, 建立了由敦煌戈壁、青海湖水体、思茅雨林组成的全球第一个多尺度、全谱段辐射校正场。发展了遥感卫星辐射校正理论与方法, 建立了高绝对精度、高空间分辨率和全谱段在轨辐射校正模型。突破了高精度辐射标准传递技术, 实现了具有国际先进水平的场地和大气光谱辐射观测。建立了国际先进的辐射校正业务运行系统, 形成了辐射校正质量保障体系^[1-4]。

经过近 20 年的运行, 中国遥感卫星辐射校正

系统针对我国各系列遥感卫星在轨辐射校正需求, 开展了近 50 多次大规模在轨遥感卫星辐射校正试验, 完成了 30 多颗国产卫星和 10 余颗国外卫星的辐射校正观测, 解决了我国遥感卫星因缺少稳定的星上定标系统而产生的定量应用问题, 在我国现代卫星遥感系统发展和应用方面发挥了不可替代的重大作用。中国遥感卫星辐射校正系统极大地推动了我国遥感卫星定量化应用水平的提高, 确保了遥感卫星效益的发挥, 使我国在这一领域进入国际先进行列^[5-10]。

中国遥感卫星辐射校正场敦煌戈壁场区位于敦煌市以西 30 km 的戈壁滩上(纬度 N40.00°~40.33°, 经度 E94.00°~94.50°), 自 2002 年通过国家验收并转入业务运行以来, 先后为我国所有对地观测遥感卫星提供了在轨辐射定标支撑。作为国际对地观测组织辐射定标与真实性检验的有地面仪器支撑的重要场地之一, 敦煌场同时为国外对地观测卫星的辐射定标和真实性检验提供地面场地同步测量数据^[11-15], 在国内外遥感定量化应用领域具有不可替代的作用。

2015 年 12 月国家卫星气象中心完成了敦煌场自动化观测基地建设, 实现了敦煌场地表反射波段辐射特性参数(包括表面双向反射分布函数(BRDF)、辐亮度)与大气状态参数(包括大气辐照度、透过率、气溶胶光学厚度、水汽总量、全天空云量、臭氧总量、温度、湿度、压强等)的全天候自动观测。所有过境遥感卫星反射波段均可利

用自动观测数据实现连续自动辐射定标^[16-18]。

敦煌场因其得天独厚的表面均匀、气候干燥等特性而被选作遥感辐射校正场,同时也具有丰富的太阳能、风能资源。2016年12月,位于敦煌场外围南侧的10 MW熔盐塔式光热发电项目(小电站)建成并投入使用^[19]。2018年12月100 MW熔盐塔式光热发电项目(大电站)投入使用^[20]。

然而,光热电站集热塔的散射辐射对敦煌场区光环境变化带来的影响需要开展深入细致的研究。本文着重研究集热塔顶吸热器的散射辐射,使用模型评估与实测分析相结合的方案对其影响进行定量分析。

2 散射辐射引起的光环境变化分析

2.1 模型模拟

利用 Monte Carlo 三维辐射传输模拟方法^[21],模拟计算集热塔顶吸热器反射光经大气多次散射后被卫星观测到的辐射能量分布情况。

由于集热塔顶吸热器的反射光不同于太阳等自然平行光源,而是非平行光源(图1);同时,探求反射光对邻近像元的影响本质上是一个三维辐射传输问题,因此,大气科学领域常用的许多针对太阳和地球辐射的平面平行辐射传输求解方法,并不适用于集热塔反射光的辐射传输模拟研究。在非平行稳态光源问题和三维辐射传输问题方面, Monte Carlo 方法是一种常用的理论模拟工具。



图1 在自动观测基地附近观察到的工作状态的集热塔
Fig. 1 Heat collection tower in working condition observed from the automatic observation base

Monte Carlo 方法是一种随机模拟方法,它并不求解辐射传输方程,而是对辐射传输的实际过

程进行直接模拟。在应用 Monte Carlo 方法模拟集热塔反射光的辐射传输过程时,模拟程序从光源处连续释放具有初始能量权重的光子,并且在大气介质中逐个跟踪这些光子的运动路径。由光源发出的光子在大气介质中将被散射和吸收。结合计算机产生的在适当区间上均匀分布的随机数以及构建的与散射过程有关的概率分布函数,可以确定光子每一次散射后的行进路程和方向。光子若被介质吸收, Monte Carlo 方法根据介质的单次散射吸收比的数值来调整该光子的能量权重,然后光子以新的能量权重在新的方向上继续前进。追踪过程一直重复下去,直到所用的光子达到一定数目,符合预期的精度,则结束此次随机模拟过程,并统计最终的大气顶出射能量分布,其用出射的光子数表示。根据上述过程,可以模拟得到卫星观测到的由集热塔光源发出并经大气多次散射后到达卫星入瞳处的辐射能量分布情况,所需要的相关参数如表1定义。

表1 模拟的相关参数定义

Tab. 1 Definitions of parameters in the simulation

相关参数	取值范围
模拟区域范围	11 km×11 km (设定集热塔位于模拟区域中心像元的中央)
水平空间分辨率	1 km
反射光源性质	离地面高度260 m;向上各角度随机发射
计算波段	0.55 μm
大气背景	中纬夏季大气考虑H ₂ O、O ₂ 、O ₃ 气体吸收和大气分子瑞利散射
气溶胶特性	光学厚度0.1;单次散射反照率0.938; 不对称因子0.764
地表特性	地表反照率0.2

2.2 实测分析

集热塔顶吸热器的表面材料为白色,经阳光汇聚后目视明亮。但与太阳相比,吸热器所造成的漫射光较为微弱,如何将其与原有的天空漫射辐射相剥离是测量的关键。如果与早期集热塔未建成,不存在光源的时候进行对比,即使在相同的观测几何下,由于大气状态的差异,也很难保证天空漫射辐射不发生变化。

敦煌场区自身的漫射辐射近似满足以太阳到观测点连线为中心的旋转对称分布^[22]。所以当大气足够稳定、晴空无云、气溶胶与下垫面分布均匀时,可以用靠近塔顶吸热器的漫射辐射减去远

离吸热器、相对于太阳对称位置的漫射辐射,以二者的差值代表单纯由吸热器漫射辐射产生的影响。

上述方法可利用 CE318 等高线观测模式获取的数据进行验证。CE318 可实现在不同太阳高度位置, 360°旋转测量等高线上的天空漫射辐射。这样的观测模式为实际测量吸热器漫射辐射提供了可能。为了排除云的影响, 需要使用云量自动观测仪辐射选取晴空数据参与计算验证。

2.2.1 观测仪器

法国 Cimel 公司生产的 CE318 太阳光度计^[23]相关参数如表 2、表 3 所示。

表 2 CE318 通道设置
Tab. 2 CE318 channel specifications

编号	中心波长/nm	带宽/nm	观测模式
1	1020	10	S、A、K
2	1640	25	S、A、K
3	870	10	S、A、K
4	675	10	S、A、K
5	440	10	S、A、K
6	500	10	S、A、K
7	1020i	10	S
8	936	10	S
9	380	2	S
10	340	2	S

表 2 中 S 代表对太阳观测, A 代表对太阳周边光晕观测, K 代表对天空光观测。

表 3 CE318 性能参数
Tab. 3 CE318 performance parameters

项目	内容
视场	1.2°
探测器	锑镓砷(InGaSn)探测器: 1020i nm, 1640 nm; 硅探测器: 其他
工作温度	-30~+60 °C
太阳追踪方法	四象限探测器主动跟踪
跟踪精度	优于0.1°
天空漫射辐射观测频率	固定时刻与大气质量数
动态范围	增益可调
量化等级	15

表 3 说明 CE318 的动态范围增益可调, 量化等级达 15 位, 观测天空漫射辐射的输出计数值在 10³ 量级, 可以满足定量分析吸热器散射辐射的需求。

为了确保天空漫射光观测数据中没有云底辐射的干扰, 使用安徽云能天智能科技有限公司生产的 ASC200 云量自动观测仪对观测时刻的云量进行监控。仪器相关参数如表 4 所示^[24]。

表 4 ASC200 性能参数
Tab. 4 ASC200 performance parameters

项目	内容
观测指标	可见光云量、红外云量、综合云量
红外波长	8~14 μm
视场角	可见光180°, 红外160°
采样周期	10 min
工作温度	-45~55 °C

CE318 是目前国际上非常通用的一款自动太阳光度计, 它采用滤光片分光的通道式设计。与光栅或棱镜分光的高光谱仪器相比可获得更可靠的观测数据, 但无法实现全波长范围的观测。由于现阶段缺少整个太阳反射波段高光谱等高线观测设备, 使用半球天空漫射辐射高光谱数据描述天空漫射光的谱形特征。所使用的自动观测仪器为由安徽光学精密机械研究所开发的漫射/总辐射比测量设备 HIM。HIM 的相关参数如表 5 所示。

表 5 HIM 性能参数
Tab. 5 HIM performance parameters

项目	内容
观测内容	总天空辐照度, 天空漫射辐照度, 漫射/总漫射比
波长	400~2400 nm
半高宽	4 nm @ 400~950 nm, 15 nm @ 950~1700 nm, 20 nm @ 1700~2400 nm
采样期	6 min
工作温度	-30~60 °C
信噪比	≥600@ 400~1000 nm, ≥300@ 1000~1700 nm, ≥200@ 1700~2400 nm(M=2, 非吸收通道)

2.2.2 等高线测量数据筛选依据

利用 CE318 自带的等高线测量模式^[23], 在每天的固定时刻与大气质量数下, 收集等高线测量数据。测量角度间隔如图 2(彩图见期刊电子版) 所示。

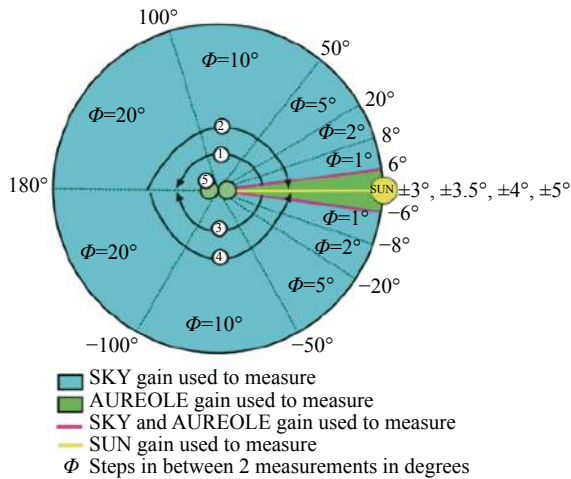


图 2 等高线测量角度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the almucantar measurement angle

图 2 中 ϕ 表示角度间隔, CE318 等高线测量模式首先从太阳位置开始, 保持高度角不变, 方位角从 0° 扫描至 $+180^\circ$ (almucantar right, ALR)。然后回到太阳位置, 保持高度角不变, 方位角从 0° 扫描至 -180° (almucantar left, ALL)。其中方位角是太阳方位角与观测方位角的差值。ALR 方位角的变化间隔为 0°S 、 3.0°A 、 3.5°A 、 4.0°A 、 5.0°A 、 6.0°A 、 6.0°K 、 7.0°K 、 8.0°K 、 10.0°K 、 12.0°K 、 14.0°K 、 16.0°K 、 18.0°K 、 20.0°K 、 25.0°K 、 30.0°K 、 35.0°K 、 40.0°K 、 45.0°K 、 50.0°K 、 60.0°K 、 70.0°K 、 80.0°K 、 90.0°K 、 100.0°K 、 120.0°K 、 140.0°K 、 160.0°K 、 180.0°K 。ALL 方位角变化间隔与其互为相反数。

观测数据的质量控制阈值如表 6 所示。为保证天空漫射辐射符合对称分布, 仅选择云量为零的观测数据参与计算。利用 CE318 的观测数据计算气溶胶光学厚度^[25], 删除光学厚度大于 0.2 的点。同时要求 ALL 与 ALR 的观测时间差异在 1 min 以内。当距离集热塔的投影大于 5 km 时, 要求 ALL 与 ALR 观测数据相对偏差的标准差要小于 1%。这一限制不适用于距离小于等于 5 km 的数据, 这是为了保留塔顶吸热器辐射带来的偏差。但仍需要通过人工判读的方式剔除 5 km 内与电站无关的明显抖动数据。当太阳与吸热器的夹角过小时, 与吸热器对称的太阳位置也可能受到影, 所以要求太阳与吸热器的地面投影距离大于 2.5 km。同时要求大小电站位于太阳的同侧, 以避免大小电站彼此出现在对称位置或离对方的对称位置过近的情况。

表 6 观测数据的质量控制阈值

Tab. 6 Quality control threshold of observation data

项目	数值
云量	0
光学厚度	<0.2
ALL与ALR相对偏差的标准差	<1%
相对偏差计算点与大小电站的投影距离	>5 km
太阳与大小电站的投影距离	>2.5 km
ALL与ALR观测时间差异	<1 min

为了尽可能地利用有效数据, 未设置电站在等高线上的投影角度与观测节点角度的差异阈值。但是需要明确的是投影角度越接近节点角度, 所得结果越接近真实情况。

2.2.3 四象限定位误差的修正

由于存在四象限定位误差, 晴空时 ALL 与 ALR 测量得到的光晕辐射差异较大。如表 3 所示 CE318 四象限定位精度为 0.1° , 对应光晕观测值的相对差异达 10%, 这将严重影响对天空漫射辐射对称性的判断。

本文提出了对四象限定位误差进行修正的算法。在敦煌天空漫射辐射符合旋转对称分布的前提下, 设计如下定位修正公式。

$$\log(v(x) \times v0_a) = a_1 \times \log(|x + a_2|) + a_3 \quad (1)$$

式(1)中 $x = [-6 -5 -4 -3.5 -3 3 3.5 4 5 6]$, 其为 ALL 与 ALR 观测太阳光晕时的相对方位角, 单位是“°”。之所以不使用更大的角度参与计算是因为电站相对方位角一般大于 50° , 如果将电站附近的数据纳入回归将减小电站可能存在的影。 $v(x)$ 是光晕模式下与 x 对应的输出计数值, $v0_a$ 是定标系数, 单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。 a_1 、 a_2 、 a_3 是最小二乘回归系数, 其中 a_2 的数值代表了四象限定位误差。

2.3 模型模拟与实测分析相结合的定量分析方法

模型模拟是以中心点(卫星观测天顶角为 0° , 距离塔顶为 0 km)为基准值 1 求取相对衰减分布, 无法计算得到绝对的辐射量值。实测方法可以得到真实的漫射辐射量值, 但仅在某几个位置有实测数据的观测几何, 无法遍及每个观测天顶角与距离。特别是极端靠近或远离塔顶时无法获取有效的实测数据。

为了实现对集热塔散射辐射的定量分析, 采用模型模拟与实测分析相结合的方法, 即先借助

模型模拟得到散射辐射相对于中心点的相对分布,再利用实测数据得到这个相对分布上某个点的实际散射辐射量值;继而推算出其他位置上的实际量值。

3 结果与分析

3.1 集热塔顶吸热器散射辐射模型模拟结果
使用 Monte Carlo 方法开展辐射传输模拟计算,对集热塔周围大气的影响开展定量分析。

图 3(彩图见期刊电子版)为卫星观测到的集热塔反射光的辐射能量水平分布示意图(卫星观测天顶角为 0° ,观测方位为正北方向)。模拟结果如表 7 所示。

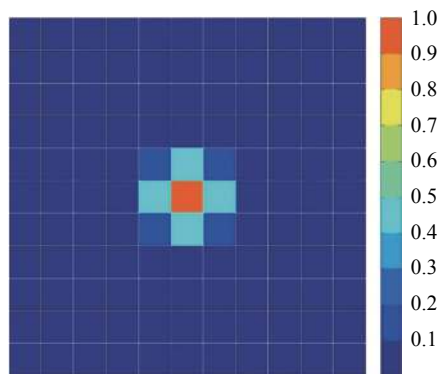


图 3 卫星观测到的集热塔反射光的辐射能量水平分布示例

Fig. 3 An example of the radiant energy level distribution of the light reflected by the heat collection tower observed by the satellite

表 7 卫星观测到的集热塔反射光的辐射能量相对分布情况

Tab. 7 The relative distribution of the radiant energy of the light reflected by the heat collection tower observed by the satellite

距离/km	0°	10°	20°	30°	40°	50°
0	1.000	0.780	0.549	0.381	0.277	0.202
1	0.434	0.369	0.285	0.194	0.179	0.162
2	0.035	0.033	0.033	0.032	0.037	0.047
3	0.020	0.019	0.020	0.021	0.023	0.027
4	0.016	0.016	0.016	0.017	0.020	0.023
5	0.015	0.015	0.015	0.016	0.018	0.021

结果显示集热塔对大气辐亮度的贡献与距离

及卫星观测天顶角相关。设集热塔所在像元在卫星观测天顶角为 0° 时的观测辐射为基准值 1, 距离集热塔 3 km 时,垂直观测时对大气的影响为 1.97%, 观测天顶角为 50° 时对大气的影响可达 2.69%。

3.2 对集热塔顶吸热器散射辐射的实测结果

图 4 为 2020 年 3 月 2 日协调世界时(UTC) 7:00:05 时刻 ASC200 云量自动观测仪拍摄到的一幅云量为零时的红外云图。

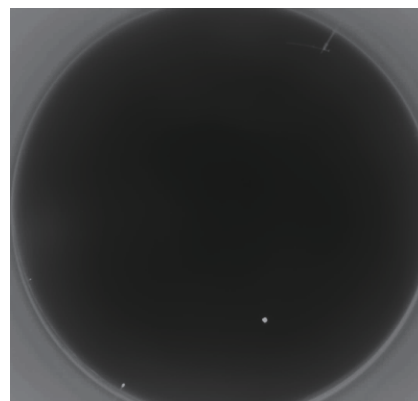


图 4 2020 年 3 月 2 日 UTC 7:00:05 时刻 ASC200 云量自动观测仪红外云图

Fig. 4 Infrared cloud image obtained from ASC200 cloud cover automatic observer at 7:00:05 UTC on March 2, 2020

与传统的可见光成像仪相比,红外成像仪云图太阳周围没有光晕,边界清晰,可避免光晕被误判为云的情况。图 4 左下角边缘处的两个亮点中,稍亮的为工作中的大电站,稍暗的为待机中的小电站。

为了保证天空漫射辐射的绝对测量精度,于 2019 年 12 月 11 日至 20 日在中国气象科学研究院顶层平台对所使用的 CE318 进行了标定。采用基准仪器 MASTER 传递溯源方式^[26],使用标准机#746 对仪器进行了定标。定标后,反演的光学厚度与 MASTER 的相对差异在 2% 以内。

完成定标后,将 CE318 安装于敦煌自动观测基地,开展了为期 3 个月的自动观测。对 2020 年 1 月 8 日—3 月 31 日收集到的 CE318 等高线观测数据进行质量控制。共采集等高线观测数据 4 011 组(观测间隔小于 1 min 的 ALL 与 ALR 组合)。按照表 6 对观测数据进行筛选后,获得有效数据 26 组,如表 8 所示。

表 8 各级筛选后有效观测数据量值统计 (组)

Tab. 8 Statistics of effective observation data after being selected at different levels (group)

筛选项目	有效观测数据值						合计
	1020 nm	1640 nm	870 nm	675 nm	440 nm	500 nm	
(a)	804	778	611	466	787	565	4011
(b)	135	132	81	54	135	70	607
(c)	45	77	47	44	43	44	300
(d)	0	3	1	6	27	22	59
(e)	0	2	1	2	22	16	43
(f)	0	2	0	1	14	9	26
(g)	0	2	0	1	14	9	26
(h)	0	2	0	1	14	9	26

其中筛选项目分别为:

(a) 观测间隔小于 1 min 的 ALL 与 ALR 组合; (b) 云量 <0; (c) 光学厚度 <0.2; (d) ALL 与 ALR 相对偏差的标准差 <1% (与大电站的投影距

离 >5 km); (e) ALL 与 ALR 相对偏差的标准差 <1% (与小电站的投影距离 >5 km); (f) 太阳与大电站的投影距离 >2.5 km; (g) 太阳与小电站的投影距离 >2.5 km; (h) 大小电站在太阳的同侧。

CE318 在 1020、1640、870、675、440 nm 和 500 nm 这 6 个通道开展等高线观测。比较 CE318 测量的 6 个通道天空漫射辐射数据, 发现波长越长, 通过 (d) 和 (e) 筛选的有效数据组数越少。这由该波段漫射辐射抖动的剧烈程度与仪器的灵敏程度共同决定。1640 nm 有效数据多于 1020 nm 的原因是 1640 nm 采用的是铟镓砷探测器, 符合所设定的质控标准且有效数据大于 3 组的通道只有 440 nm 和 500 nm。因此针对这两个通道展开具体的分析, 统计结果如表 9 和表 10 所示。其中小电站相对于场地自动观测基地距离 2.86 km, 方位角为 110.48°。大电站相对于场地自动观测基地距离 3.83 km, 方位角为 149.98°。

表 9 吸热器散射辐射带来的相对偏差 (440 nm)

Tab. 9 Relative deviation due to scattered radiation from the heat absorber (440 nm)

UTC Time	AOD	Sz/(°)	Sa/(°)	Beta/(°)	HB/km	on	DegB/(°)	DdegB/(°)	RdevB/%	RdevBr/%	HS/km	on	DegS/(°)	DdegS/(°)	RdevS/%	RdevSr/%
03-10 08:59	0.15	61.83	235.34	0.07	2.06	1	85.37	4.63	-1.18	-1.08	1.54	0	124.87	4.87	-0.29	-0.31
03-10 07:59	0.14	53.28	220.75	0.11	2.86	1	70.77	0.77	-1.14	-0.92	2.14	0	110.27	9.73	-1.57	-1.49
03-10 06:59	0.15	47.20	202.90	0.13	3.55	1	52.92	2.92	-0.04	0.31	2.65	0	92.42	2.42	-1.37	-1.18
03-09 10:27	0.17	77.14	252.07	0.09	0.88	1	102.09	2.09	-0.70	-0.72	0.66	0	141.59	1.59	0.24	0.14
03-09 09:59	0.15	72.12	247.04	0.12	1.24	1	97.06	2.94	-2.11	-2.07	0.93	0	136.56	3.44	-0.63	-0.74
03-02 09:02	0.15	64.41	233.46	0.06	1.84	1	83.48	3.48	-0.51	-0.42	1.38	1	122.98	2.98	-1.23	-1.24
03-02 07:02	0.18	50.22	202.09	0.13	3.19	1	52.12	2.12	-0.20	0.19	2.39	0	91.62	1.62	-1.47	-1.28
02-27 10:14	0.14	77.10	246.64	0.09	0.88	1	96.66	3.34	-0.89	-0.87	0.66	0	136.16	3.84	-0.75	-0.84
02-27 09:02	0.16	65.23	232.61	0.16	1.77	1	82.63	2.63	-1.47	-1.23	1.33	0	122.13	2.13	0.47	0.39
02-27 08:02	0.19	57.00	218.41	0.09	2.49	1	68.43	1.57	0.09	0.30	1.86	0	107.93	7.93	1.33	1.38
02-27 07:02	0.18	51.24	201.49	0.08	3.08	1	51.51	1.51	-0.51	-0.29	2.30	0	91.02	1.02	-0.61	-0.50
01-25 09:24	0.16	76.61	230.44	0.11	0.92	1	80.46	0.46	-0.18	0.00	0.69	0	119.97	0.03	-0.81	-0.91
01-25 09:03	0.17	73.56	226.29	0.06	1.13	1	76.32	3.68	-0.14	-0.03	0.85	0	115.82	4.18	-0.60	-0.64
01-10 07:56	0.19	68.63	211.65	0.04	1.50	0	61.67	1.67	-1.02	-0.89	1.12	1	101.17	1.17	-0.44	-0.43

表 10 吸热器散射辐射带来的相对偏差 (500 nm)

Tab. 10 Relative deviation due to scattered radiation from the heat absorber (500 nm)

UTC Time	AOD	Sz/(°)	Sa/(°)	Beta/(°)	HB/km	on	DegB/(°)	DdegB/(°)	RdevB/%	RdevBr/%	HS/km	on	DegS/(°)	DdegS/(°)	RdevS/%	RdevSr/%
03-10 09:00	0.14	62.01	235.59	0.12	2.04	1	85.61	4.39	-0.85	-0.63	1.53	0	125.11	5.11	0.88	0.87
03-10 08:00	0.14	53.42	221.04	0.25	2.85	1	71.06	1.06	-0.74	-0.14	2.13	0	110.56	9.44	-1.19	-0.97
03-03 08:03	0.15	55.92	219.77	0.14	2.60	1	69.80	0.20	-4.01	-3.65	1.94	0	109.30	9.30	-1.21	-1.10
02-27 10:16	0.14	77.30	246.84	0.08	0.87	1	96.86	3.14	0.29	0.32	0.65	0	136.36	3.64	-0.10	-0.18
02-27 07:03	0.16	51.32	201.84	0.14	3.07	1	51.86	1.86	-2.24	-1.81	2.29	0	91.36	1.36	-0.46	-0.22
01-25 09:25	0.15	76.80	230.69	0.17	0.90	1	80.71	0.71	0.57	0.88	0.68	0	120.21	0.21	-0.09	-0.21
01-25 09:04	0.16	73.72	226.51	0.11	1.12	1	76.54	3.46	0.68	0.93	0.84	0	116.04	3.96	-0.20	-0.25
01-10 08:58	0.17	75.87	224.52	0.08	0.97	0	74.54	4.54	0.49	0.71	0.72	1	114.04	5.96	0.31	0.28
01-10 07:57	0.17	68.75	211.92	0.07	1.49	0	61.94	1.94	-0.50	-0.25	1.12	1	101.44	1.44	-0.02	0.01

在表 9 和表 10 中, AOD 表示气溶胶光学厚度, Sz 与 Sa 分别是太阳天顶角与方位角, Beta=

a₂ 是四象限定位修正角。HB 与 HS 分别代表等高线处于大小电站上方的距离, on 表示电站的工

作情况, 1 为正常工作, 0 为待机。DegB 与 DegS 表示太阳方位角与大小电站方位角的差值。DdegB 与 DdegS 表示大小电站与等高线观测节点角度差。RdevB 与 RdevS 表示四象限定位修正前大小电站与太阳轴对称位置处的辐亮度的相对偏差, $RdevB_r$ 与 $RdevS_r$ 则表示四象限定位修正后大小电站相对偏差。

图 5 给出表 9 与表 10 中有效数据对应时刻

的全天空漫射辐射相对光谱分布图, 并与 CE318 不同通道光谱响应函数进行了对比。由于 HIM 在 2020 年 2 月 27 日出现故障, 所以缺少这天的数据。从图中可以发现在 440 nm 和 500 nm 这两个通道天空散射辐射能量的分布是最强的, 相对而言, 信噪比高, 受大气波动影响小。这样可以从谱形分布角度说明仅 440 nm 和 500 nm 通道满足筛选要求是合理的。

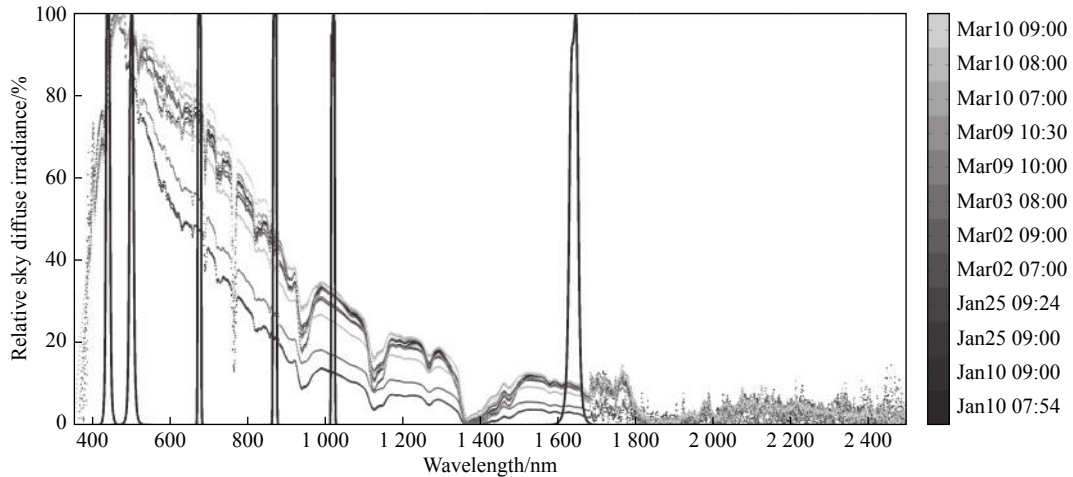


图 5 归一化的全天空漫射辐射光谱与 CE318 不同通道光谱响应函数

Fig. 5 Normalized full sky diffuse irradiance and CE318 spectral response function

太阳的天顶角越大, 等高线距离塔顶的距离也就越近, 但很难获得等高线离吸热器距离非常近的点。已知大电站集热塔高度为 260 m, 太阳在这个高度时已经接近傍晚, 吸热器的亮度有限, 所造成的散射辐射与天空漫射辐射都淹没在观测噪声中无法测量。在表 9 和表 10 中, 观测距离范围是 0.65~3.55 km。可以发现满足质量控制的数据中, 小电站正常工作的数据较少, 仅有 4 条。下面仅以大电站正常工作时的数据进行分析。

叠加吸热器辐射的天空漫射辐射理论上应该大于没有叠加的那一边。但是 440 nm 和 500 nm 通道的 $RdevB_r$ 有为负的情况, 最小值分别为 -2.07%(03-09 09:59) 和 -3.65%(03-03 08:03)。负值的存在说明虽然制定了严格的质量控制标准, 但所确定的有效观测中, 等高线上的天空漫射辐射还是存在小范围的波动。具体比较上述两个通道相对偏差 $RdevB_r$ 最小的情况如图 6 与图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。

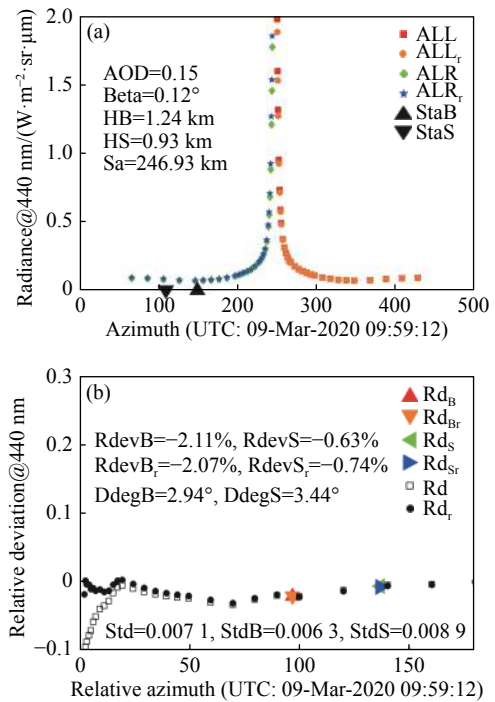


图 6 440 nm 通道 $RdevB_r$ 为最小值(-2.07%)时对应时刻 (03-09 09:59) 的辐亮度 (a) 与相对偏差 (b)

Fig. 6 Radiance (a) and relative deviation (b) at the corresponding time (03-09 09:59) when the 440nm channel $RdevB_r$ is the minimum (-2.07%)

图 6 与图 7 中图例 Rd_B 、 Rd_{Br} 、 Rd_S 、 Rd_{Sr} 、 Rd_r 分别代表 $Rdev_B$ 、 $Rdev_{Br}$ 、 $Rdev_S$ 、 $Rdev_{Sr}$ 和修正前后电站所在半等高线与对称半等高线天空漫射辐射的相对偏差 $Rdev$ 和 $Rdev_r$ 。Std 是 1 min 内 ALL 与 ALR 观测天空漫射辐射相对偏差的标准差。StdB 与 StdS 分别是距离大、小电站投影距离大于 5 km 的 ALL 与 ALR 的标准差。图 6 的 Rd_r 明显存在一个独立于电站影响的波动, 图 7 的 Rd_r 波动则更为明显。电站对漫射辐射的增益无法抵消波动带来的减小, 因此对应的 $Rdev_{Br}$ 为负值。为了保留吸热器辐射带来的偏差, 未对方差过大的距电站投影距离 ≤ 5 km 的数据进行剔除, 因此需要进一步通过人工判读的方式剔除 5 km 内与电站无关的明显抖动数据。据此人工剔除 440 nm 03-09 09:59 时刻, 500 nm 03-03 08:03、02-27 07:03 时刻的数据。

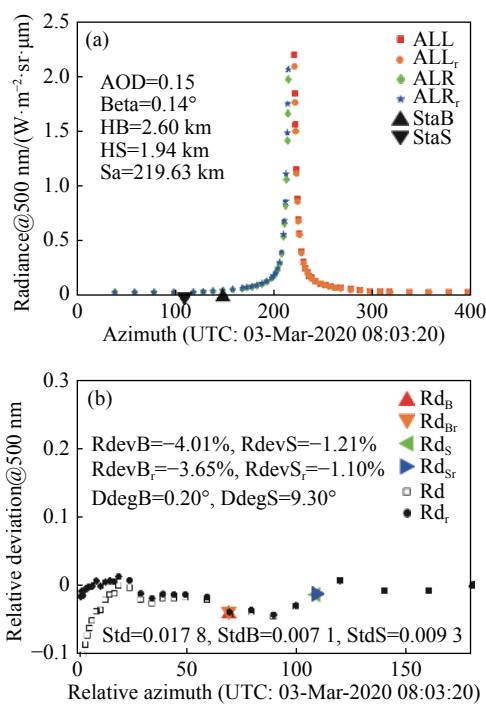


图 7 500 nm 通道 $Rdev_{Br}$ 为最小值(-3.65%)时对应时刻(03-03 08:03)的辐亮度 (a) 与相对偏差 (b)

Fig. 7 Radiance (a) and relative deviation (b) at the corresponding time (03-03 08:03) when the 500 nm channel $Rdev_{Br}$ is the minimum (-3.65%)

对筛选后的数据进行统计对比, 440 nm 大电站工作时的 $Rdev_{Br}$ 均值为-0.57%, 方差为 0.51%, 小电站待机时的 $Rdev_{Sr}$ 均值为-0.59%, 方差为 0.82%。说明大电站附近的天空漫射辐射平

均值略小于太阳对称位置的辐射值, 叠加吸热器的辐射也未能改变。待机状态小电站的 $Rdev_{Sr}$ 反映的是自然情况下天空漫射辐射的差异。小电站附近天空漫射辐射与对称位置辐射的差异以 0.82% 的方差略有波动。在 440 nm 工作状态大电站未对天空漫射辐射带来明显影响。

500 nm 大电站工作时的 $Rdev_{Br}$ 均值为 0.27%, 方差为 0.67%。小电站待机时的 $Rdev_{Sr}$ 均值为 -0.15%, 方差为 0.66%。说明 500 nm 工作状态大电站会对天空漫射辐射带来微小影响。对应的 $Rdev_{Br}$ 最大值为 0.93%(01-25 09:04), 如图 8(彩图见期刊电子版)所示。说明在有效数据对应的观测几何下(距离 HB 0.87~3.07 km, 观测天顶角 Sz 77.30°~51.32°)吸热器对天空漫射辐射的影响不超过 0.93%。

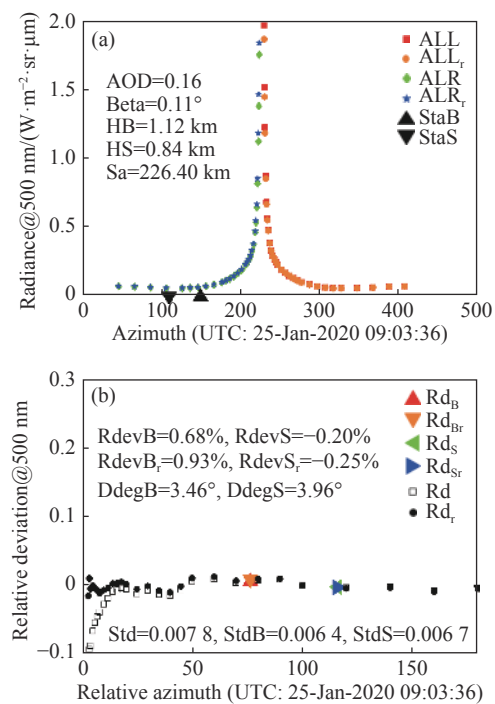


图 8 500 nm 通道 $Rdev_{Br}$ 为最大值(0.93%)时对应时刻(01-25 09:04)的辐亮度 (a) 与相对偏差 (b)

Fig. 8 Radiance (a) and relative deviation (b) at the corresponding time (01-25 09:04) when the 500 nm channel $Rdev_{Br}$ is the maximum (0.93%)

3.3 模型模拟与实测分析相结合分析

表 10 说明 $Rdev_{Br}$ 随距离的变化规律不明显。为了进一步分析大电站吸热器散射辐射的影响, 下面与模型模拟的结果结合起来分析。

以 500 nm 为例, 实测有效数据中观测天顶角最小为 51.32°, 对应与大电站的距离为 3.07 km, 最接近于表 7 中 3 km、50°时的情况(0.027)。观测天顶角最大为 77.30°, 与大电站的距离 0.87 km, 对表 7 数据开展二维插值外推, 可计算得到相应值为 0.10。根据实测结果吸热器对天空漫射辐射的影响不超过 0.93%, 与 0.027 等比例换算后可得到大电站漫射辐射与太阳对称位置的相对偏差随距离与观测角度变化情况, 如表 11 所示。与 0.10 等比例换算时表 11 的数值还要再减小 3.7 倍, 保守起见以对漫射辐射影响最大的数据作为分析依据。

表 11 大电站散射辐射带来的天空漫射辐射相对变化随距离与观测角度变化 (%)

Tab. 11 The relative change of the sky diffuse radiation caused by the scattered radiation from the large power station changes with distance and the observation angle (%)

距离/km	天空漫射辐射相对变化(%)					
	0°	10°	20°	30°	40°	50°
0	34.44	26.87	18.91	13.12	9.54	6.96
1	14.95	12.71	9.82	6.68	6.17	5.58
2	1.21	1.14	1.14	1.10	1.27	1.62
3	0.69	0.65	0.69	0.72	0.79	0.93
4	0.55	0.55	0.55	0.59	0.69	0.79
5	0.52	0.52	0.52	0.55	0.62	0.72

参考文献:

- [1] 张勇, 祁广利, 戎志国. 卫星红外遥感辐射定标模型与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHANG Y, QI G L, RONG ZH G. *Models and Methodologies of Radiometric Calibrations for Satellite Infrared Remote Sensors* [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 832-841.
LU N M, GU S Y. Review and prospect on the development of meteorological satellites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 832-841. (in Chinese)
- [3] ZAHNG Y, LI ZH L, LI J. Comparisons of emissivity observations from satellites and the ground at the CRCS Dunhuang Gobi site[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(22): 13026-13041.
- [4] 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.
- [5] 张勇, 李元, 戎志国, 等. 中国遥感卫星辐射校正场陆表热红外发射率光谱野外测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1213-1217.
ZHANG Y, LI Y, RONG ZH G, et al.. Field measurement of gobi surface emissivity spectrum at Dunhuang calibration site of China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1213-1217. (in Chinese)

4 结 论

文中定位修正对均匀性判断结果的影响是明显的。有效数据中四象限定位修正角平均值为 0.11°, 接近仪器官方标称精度(0.1°)。修正前后数据对的相对偏差在方位角小于 50°时较为明显。以 3°光晕处电站所在半等高线与无干扰半等高线相对偏差为例, 修正前的平均相对偏差达-9.18%, 修正后仅为-1.34%。如果不使用修正, 有效数据个数将从 26 组降低为 5 组。此方法对 CE318 天空漫射测量数据的准确使用具有借鉴意义。

收集 2020 年 1 至 3 月满足设定阈值的 CE318 数据显示对于 440 nm 通道, 工作状态大电站未对天空漫射辐射带来明显影响。除了 500 nm 通道, 在有效数据对应的观测几何下(距离 HB 0.87~3.07 km, 观测天顶角 Sz 77.30°~51.32°)吸热器对天空漫射辐射的影响不超过 0.93%。与模型模拟的结果结合起来分析后, 可以得出当距离电站 2 km 时大电站散射辐射带来的天空漫射辐射相对变化<2%, 大于等于 3 km 时相对变化<1% 的结论。

综上, 中国遥感卫星辐射场敦煌场区周边的光电项目建设和运行对场区光环境变化影响极为有限, 不会对已有的场区地表、大气观测设施和观测数据造成影响。

致谢: 感谢敦煌市气象局和敦煌光电产业园的各位同仁在收集相关信息资料时给予的大力帮助。

- [6] 张勇, 戎志国, 闵敏. 中国遥感卫星辐射校正场热红外通道在轨场地辐射定标方法精度评估[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(2): 171-179.
ZHANG Y, RONG ZH G, MIN M. Accuracy evaluations of the CRCS In-orbit field radiometric calibration methods for thermal infrared channels[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(2): 171-179. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y X, ZHANG G SH, LIU ZH Q, *et al.*. Spectral reflectance measurements at the China radiometric calibration test site for the remote sensing satellite sensor[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15(3): 377-382.
- [8] 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.
LI Y, RONG ZH G, ZHENG ZH J, *et al.*. Post launch site calibration of visible and near-infrared channels of FY-3A visible and infrared radiometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12): 2966-2974. (in Chinese)
- [9] 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.
LI Y, ZHANG Y, LIU J J, *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. (in Chinese)
- [10] 孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的FY-3 MERSI反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1869-1877.
SUN L, GUO M H, XU N, *et al.*. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1869-1877. (in Chinese)
- [11] HAN Q J, ZHANG X W, LIU L, *et al.*. Lifetime radiometric calibration of HJ-1A/B CCD sensor using Dunhuang Gobi site[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9299: 92990B.
- [12] ZHANG X W, HAN Q J, LIU L. Using the Dunhuang test site to monitor the radiometric stability of the ZY-3 multispectral sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9298: 92980H.
- [13] CHEN ZH CH, ZHANG B, ZHANG H, *et al.*. Vicarious calibration of Beijing-1 multispectral imagers[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1432-1450.
- [14] LI Y, RONG ZH G, LI Y Q, *et al.*. Solar reflection band site automatic calibration by the Dunhuang site automatic observation radiometric calibration operational system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11127: 111271M.
- [15] LI Y, RONG Z G, LI Y Q, *et al.*. Introduction of Dunhuang site automatic observation radiometric calibration operational system (DARCOS)[C]. *Proceedings of CEOS-WGCV-IVOS Meeting 31*, 2019.
- [16] 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.
LÜ J Y, HE M Y, CHEN L, *et al.*. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0801003. (in Chinese)
- [17] 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.
QIU G G, LI X, WEI W, *et al.*. Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0701001. (in Chinese)
- [18] ZHANG Y, LI X, RONG ZH G, *et al.*. China radiometric calibration sites ground-based automatic observing systems for CAL/VA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9639: 96391E.
- [19] 敦煌市委宣传部. 敦煌首航节能10兆瓦塔式熔盐光热发电项目有序推进[EB/OL]. (2015-05-04). <http://www.cspplaza.com/article-5110-1.html>.
The Publicity Department of Dunhuang municipal Party committee. The energy-saving 10 MW tower molten salt solar thermal power generation project of Dunhuang Capital Airlines was promoted in an orderly manner[EB/OL]. (2015-05-04). <http://www.cspplaza.com/article-5110-1.html>.
- [20] 环球网. 敦煌100 MW塔式熔盐光热电站土建完成进入安装环节[EB/OL]. (2018-05-18). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1600755797116589317&wfr=spider&for=pc>.
Global network. The civil engineering of Dunhuang 100MW tower molten salt optical thermal power station has been completed and entered the installation link[EB/OL]. (2018-05-18). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1600755797116589317&wfr=spider&for=pc>.
- [21] 胡丽琴. 风云四号卫星闪电辐射观测的辐射传输模拟研究[C]. 2011年第二十八届中国气象学会年会论文集, 中国气象学会, 2011: 1-10.

- HU L Q. Radiative transfer simulation of the Fengyun-4 lightning radiation observation[C]. *Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society*, Chinese Meteorological Society, 2011: 1-10. (in Chinese)
- [22] YAO W X, LI ZH R, ZHAO Q, *et al.*. A new anisotropic diffuse radiation model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 95: 304-313.
- [23] Cimel. Multiband photometer CE318-T User's Manual (rev. January 2018) [EB/OL]. (2021-8-16). https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/CE318_T_Photometer_UserManual_V4.3.pdf.
- [24] FA T, XIE W Y, WANG Y R, *et al.*. Development of an all-sky imaging system for cloud cover assessment[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5516-5524.
- [25] ESTELLES V, CAMPANELLI M, UTRILLAS M P, *et al.*. Comparison of AERONET and SKYRAD4.2 inversion products retrieved from a Cimel CE318 sunphotometer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(3): 569-579.
- [26] BARRETO Á, CUEVAS E, GRANADOS-MUÑOZ M J, *et al.*. The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer – A comprehensive performance evaluation[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(2): 631-654.

作者简介:



李元(1978—),女,北京人,工学博士,国家卫星气象中心副研究员,2001年,2006年于北京理工大学分别获学士,博士学位,主要从事在轨传感器定标与产品反演等方面的研究。

E-mail: liyuan@cma.gov.cn



张勇(1977—),男,陕西镇巴人,理学博士,国家卫星气象中心研究员,2000年,2003年于西北大学分别获学士,硕士学位,2006年于中国科学院遥感应用研究所获博士学位,主要从事卫星传感器辐射定标与真实性检验方面的研究。E-mail: zhangyong@cma.gov.cn