

光学载荷定标场比辐射率方向性模型构建

刘佳欣^{1,3}, 杨治伟², 高彩霞^{1*}, 马慧雅^{1,3}, 赵恩宇⁴, 段四波⁵

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100094;

2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 乌鲁木齐 830006;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;

5. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 地表比辐射率方向性研究是国际热红外定量遥感研究领域的热点与难点, 现有的热红外沙地比辐射率方向性模型存在先验参数较多、精度较低、适用性差等问题。论文基于 5 个伪不变定标场, 即 Algeria3_1km、Algeria5_1km、Libya1_1km、Mauritania1_1km 及 Mauritania2_1km, 综合利用长时序极轨卫星载荷 AQUA/MODIS 与静止轨道卫星载荷 MSG/SEVIRI 多角度观测数据, 经过载荷相互校准、大气纠正、影像数据时空匹配等处理, 基于热红外辐射传输方程, 获取 0~65° 观测天顶角范围内各研究区方向性比辐射率, 建立公里级像元尺度比辐射率方向性模型, 并对其进行了不确定度评估。结果表明: 地表比辐射率随观测天顶角增大而降低, 其方向性效应随波段中心波长的增加而减小, Algeria5_1km 区域的方向性效应最小, Mauritania1_1km 区域的方向性效应最强; 各研究区比辐射率方向性模型不确定度均随观测天顶角的增大而增大, 模型不确定度均优于 3%。

关键词: 热红外遥感; 地表比辐射率; 方向性模型; 误差传递理论

中图分类号: TP722.5

文献标识码: A

Research on emissivity directionality of radiometric calibration sites for optical sensors

LIU Jia-Xin^{1,3}, YANG Zhi-Wei², GAO Cai-Xia^{1*}, MA Hui-Ya^{1,3}, ZHAO En-Yu⁴, DUAN Si-Bo⁵

(1. National Engineering Laboratory for Satellite Remote Sensing Applications, Aerospace Information Research

Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute, Urumqi 830006, China;

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

4. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

5. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The research on the surface emissivity directionality is a hot and difficult issue in the international thermal infrared quantitative remote sensing area. The existing emissivity directional models for sandy area in thermal infrared bands have some disadvantages, such as too many prior parameters, low accuracy and poor applicability. Therefore, with the aid of long-time series (2018-2020) multi-angle observations from geostationary-orbit MSG/SEVIRI and polar-orbit AQUA/MODIS, after data pre-processing related to inter-sensor calibration, atmospheric correction, spatial and temporal matching, we retrieved the directional emissivity under different viewing zenith angles (VZAs) between 0~65° over five pseudo-invariant calibration sites based on the thermal infrared radiation transfer equation, including Algeria3_1km, Algeria5_1km, Libya1_1km, Mauritania1_1km and Mauritania2_1km. Subsequently, a model for retrieving the kilometer-scale directional emissivity was established, and its uncertainty was evaluated. The result shows that the sur-

收稿日期: 2022-12-30, 修回日期: 2023-02-08

Received date: 2022-12-30, Revised date: 2023-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(42271395)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (42271395)

作者简介 (Biography): 刘佳欣 (1999—), 女, 新疆阿勒泰人, 硕士研究生, 主要研究领域为热红外定量遥感. E-mail: liujiaxin21@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: gaocaixia@aoe.ac.cn

face emissivity decreases with the increase in VZA, and the directional effect decreases with the increase in the MODIS band central wavelength; Algeria5_1km has the smallest directional effect, and Mauritania1_1km has the strongest effect, the uncertainty of the directional emissivity model in each region increases with VZA, and is better than 3%.

Key words: thermal infrared remote sensing, land surface emissivity, directional model, error propagation theory

PACS:

引言

地表发射率(Land Surface Emissivity, LSE)指在相同热力学温度下,自然表面的热辐射与黑体热辐射的比值,其作为地球表面的一种固有属性,与地表类型、地表粗糙度、观测角度及测量的波长等因素有关^[1-2]。LSE为描述地球表面系统辐射特性的物理量,是精准获取国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Program, IGBP)地表温度的关键参数,在矿物质识别、生态监测和能量平衡等方面具有广泛的应用^[3-5]。

现有地表比辐射率、地表温度反演算法多将地表视为朗伯体(如分裂窗算法,假设地表亮温具有各向同性的特征),忽视地表比辐射率方向性效应产生的影响,这势必对温度反演、载荷定标及验证等方面的精度产生影响^[6]。Coll等人于2017年使用单通道法,分别对AATSR星下点及倾斜观测影像进行处理并获取地表亮度温度数据,其结果表明:针对裸地与常绿森林下垫面,由观测角度效应导致的地表亮温差异分别为1.6~3.3 K与0.7~2.2 K^[7]。目前,热辐射/比辐射率方向性模型大致分为辐射传输模型、几何光学模型、参数化模型及混合模型等^[8-10],主要聚焦于植被冠层,针对土壤、沙漠以及水体等目标的比辐射率方向性模型相对较少,并且大部分模型是基于实验室内理想条件下构建而成,考虑土壤粗糙度、砂土和粘土含量等因素,而忽略土壤湿度和土壤有机质含量等因素的影响^[11-12],无法直接适用于热红外辐射地基产品的验证。基于物理机理的热辐射方向性模型多聚焦于单一下垫面的点尺度精细化描述,需要众多输入参数和大量的迭代计算,并且其模型精度受到输入参数精度的限制,同样无法直接适用于现实多变自然条件下的光学遥感载荷定标及温度产品归一化的应用需求。

本文利用静止和极轨卫星载荷观测多角度信息,基于热红外辐射传输方程,获取辐射定标场方向性地表比辐射率,探索其随观测角度的变化规律,构建像元尺度地表比辐射率方向性模型。同时,基于误差传递理论,定量化评估每项误差因素

对比辐射率方向性模型的影响,为进一步优化比辐射率方向性模型提供依据。

1 研究区及数据介绍

1.1 研究区介绍

2008年国际卫星对地观测委员会定标与真实性检验组(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)评估选定的5个伪不变定标场(Pseudo Invariant Calibration Sites, PICS),其下垫面均为沙地和戈壁,地势平坦,地物覆盖类型单一,气候干燥且大气通透性良好,地表光谱特性稳定,在可见光-近红外波段(0.4~2.5 μm)空间均一性与时间稳定性均优于3%^[13-16]。目前已广泛应用于Landsat、SPOT、IKONOS、NOAA、ALOS等卫星的辐射定标验证和辐射特性稳定性分析,以及遥感载荷的交叉辐射定标研究^[17-19]。

为了甄选具备高空间均一性且时间稳定的区域,本文基于滑动窗口法进行地表空间均一性分析,并利用变异系数(Coefficient of Variation, CV)指标进行比辐射率时间稳定性分析,甄选出热红外波段1km空间尺度下,Algeri3_1km、Algeria5_1km、Libya1_1km、Mauritania_1km及Mauritania2_1km均匀稳定的目标区域(见图1),其空间亮温标准偏差均小于0.3 K,地表比辐射率时间稳定性优于2%^[20],其中心地理坐标及面积如下表所示。

表1 目标区域地理信息

Table 1 Geographic information of the regions of interest

| 场地名称 | 经度/ $^{\circ}$ | 纬度/ $^{\circ}$ | 区域面积/ Km^2 |
|-----------------|----------------|----------------|---------------------|
| Algeria3_1km | 7.74 | 30.37 | 75×75 |
| Algeria5_1km | 2.13 | 31.37 | 75×75 |
| Libya1_1km | 13.35 | 24.12 | 50×50 |
| Mauritania1_1km | -9.20 | 19.60 | 50×50 |
| Mauritania2_1km | -8.63 | 20.70 | 75×75 |

1.2 卫星数据介绍

AQUA太阳同步极轨卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS),拥有36个通道,覆盖可见光-热红外

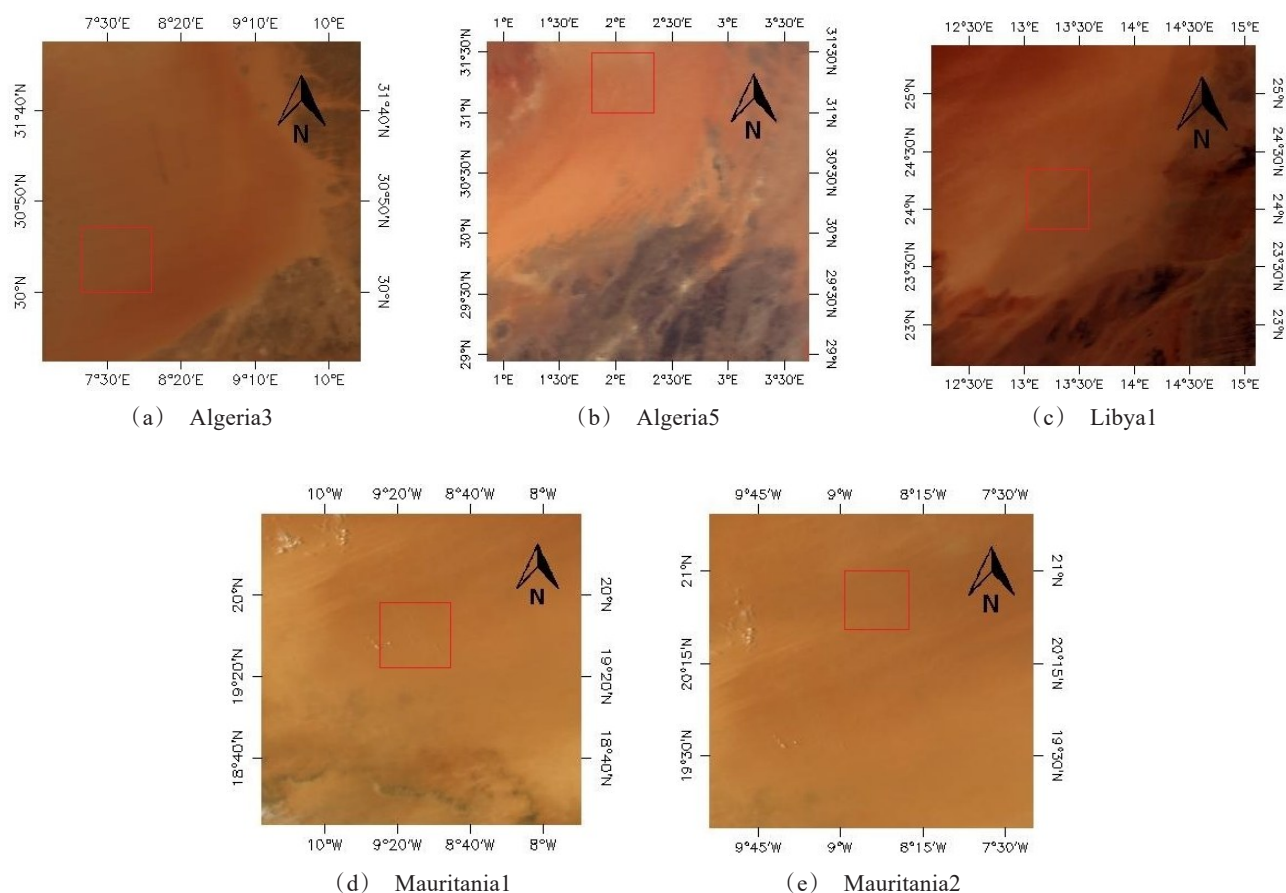


图1 Algeria3、Algeria5、Libya1、Mauritania1 及 Mauritania2 研究区 MODIS 影像(红色方框表示研究区域)

Fig. 1 MODIS images over Algeria3, Algeria5, Libya1, Mauritania1 and Mauritania2 areas (study area is shown in red square)

(0.4~14.4 μm) 谱段, 每 1~2 天提供一次全球覆盖性观测, 用以准确预测全球变化情况。其轨道高度为 705km, 观测天顶角范围为 $\pm 55^\circ$, 考虑到地球曲率的影响, 扫描带边缘地区的实际观测天顶角约为 $\pm 65^\circ$ ^[21-22]。AQUA/MODIS 于地方时下午 13:30 过境, 提供了相应 MYD 系列产品^[23]。其中, MYD21 产品基于温度发射率分离 (Temperature Emissivity Separation, TES) 算法, 提供空间分辨率为 1km, 包含 MODIS 的地表温度及三个热红外波段 (29、31 和 32 波段) 的地表比辐射率数据^[24]。其反演的地表比辐射率考虑了观测天顶角的影响, MODIS 29 波段比辐射率随观测角度的变化可达 0.038, 31 和 32 波段的变化均小于 0.01^[25]。本文选用 MYD21 地表比辐射率产品作为比辐射率方向性模型的初始值, 并同时配合使用 MYD03 地理格网数据及 MYD35 云掩膜数据进行数据裁减、重采样及无云数据筛选等预处理工作。

第二代气象卫星 (Meteosat Second Generation,

MSG) 是由欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 和欧洲气象卫星应用组织 (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellite, EUMETSAT) 研发的系列静止气象卫星, 共有四颗, 目前仍有三颗卫星在轨, 分别为 MSG-2、MSG-3 和 MSG-4。其中 MSG-2 搭载的改进型自旋可见光-红外成像仪 (Spinning Enhanced Visible and Infra-red Imager, SEVIRI) 是一种用于监测气候的多光谱辐射计, 共有 12 个波段, 光谱覆盖范围为 0.4~14.4 μm , 包含 11 个空间分辨率为 3 km 的窄波段与 1 个空间分辨率为 1 km 的宽波段^[26]。静止卫星具有较高的时间分辨率, MSG-2/SEVIRI 每隔 15 min 获取一次数据^[27]。MODIS 和 SEVIRI 热红外通道特征参数如表 2 所示。

本文选用 2018~2020 年期间目标区域 AQUA/MODIS 和 MSG/SEVIRI 无云且载荷成像时间差异小于 7.5 min 的热红外影像数据作为数据源, 降低因载荷成像时间差异而导致的载荷入瞳辐亮度差异,

表 2 AQUA/MODIS 和 MSG-2/SEVIRI 热红外通道参数

Table 2 AQUA/MODIS and MSG-2/SEVIRI thermal infrared bands parameters

| 载荷 | 波段序号 | 中心波长/ μm | 光谱范围/ μm | 信噪比/NE Δ T |
|--------|------|---------------------|---------------------|-------------------|
| MODIS | 29 | 8.55 | 8.4~8.7 | 0.05 K |
| | 30 | 9.73 | 9.58~9.88 | 0.25 K |
| | 31 | 11.03 | 10.78~11.28 | 0.05 K |
| | 32 | 12.02 | 11.77~12.27 | 0.05 K |
| | 33 | 13.335 | 13.185~13.485 | 0.25 K |
| | 34 | 13.635 | 13.485~13.785 | 0.25 K |
| | 35 | 13.935 | 13.785~14.085 | 0.25 K |
| SEVIRI | 6 | 6.25 | 5.35~7.15 | 0.75 K |
| | 7 | 8.7 | 8.3~9.1 | 0.28 K |
| | 8 | 9.66 | 9.38~9.94 | 1.5 K |
| | 9 | 10.8 | 9.8~11.8 | 0.25 K |
| | 10 | 12 | 11~13 | 0.37 K |
| | 11 | 13.4 | 12.4~14.4 | 1.80 K |

反演获取地表方向性比辐射率值,并以此来构建比辐射率方向性模型。为了降低不同传感器波段之间光谱差异及大气吸收与散射效应带来的影响,选取位于大气窗口的 MODIS 29 波段、31 波段与 32 波段以及对应的 SEVIRI 7 波段、9 波段与 10 波段影像数据作为多源卫星数据集。图 2 为 AQUA/MODIS 传感器与 MSG-2/SEVIRI 传感器相应通道的光谱响应函数。

1.3 大气廓线数据介绍

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)大气再分析数据(Reanalysis v5, ERA5)为最新一代再分析数据,ERA5 数据集能够提供从 1979 年至今的大气参数、地表参数以及海表参数等数据。ERA5 大气

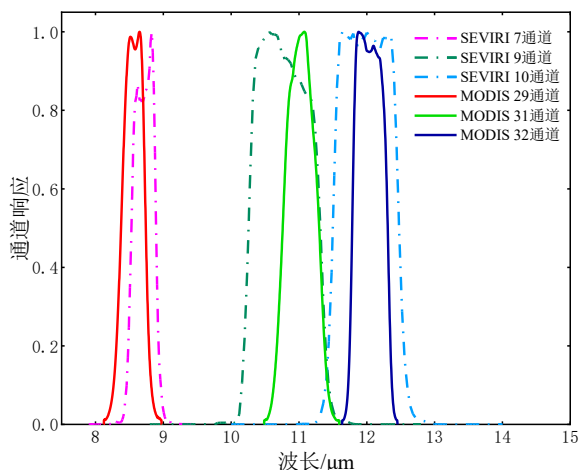


图 2 MODIS 29/31/32 及 SEVIRI 7/9/10 波段光谱响应函数
Fig. 2 Spectrum function of MODIS/29/31/32 and SEVIRI 7/9/10 channels

廓线数据集时间分辨率为 1h,在水平方向的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向的数据共 37 层,包含大气温度、湿度及臭氧等参数。本文选用 ECMWF/ERA5 大气廓线数据作为 MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Transmission) 大气辐射传输模型的输入参数,模拟计算大气上行辐射、大气下行辐射及大气透过率等参数,用于地表比辐射率方向性模型的构建。图 3 展示了 Algeria3_1km 区域部分 ERA5 大气廓线数据。

2 多源热红外载荷目标比辐射率方向性模型构建方法

多源传感器热红外地表比辐射率反演方法基于热红外辐射传输方程推导得到,在局地热平衡的晴空无云条件下,热红外辐射传输方程如下:

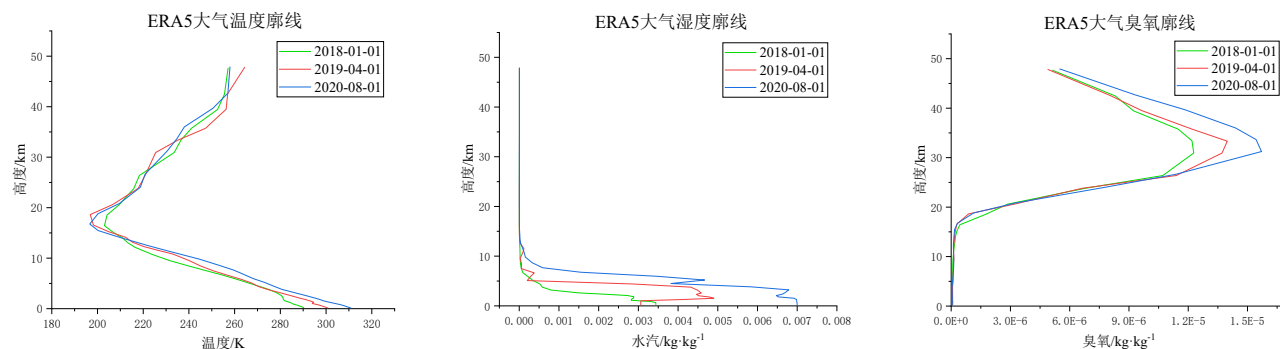


图 3 Algeria3_1 km 区域 ECMWF/ERA5 大气廓线数据

Fig. 3 ECMWF/ERA5 atmospheric profile data over Algeria3_1 km

$$L_{\lambda}(\theta_s, \varphi_s) = \left\{ \varepsilon_{\lambda}(\theta_s, \varphi_s) B_{\lambda}(T_s) + [1 - \varepsilon_{\lambda}(\theta_s, \varphi_s)] L_{at_{\lambda \downarrow}} \right\} / \left\{ \tau_{\lambda}(\theta_s, \varphi_s) + L_{at_{\lambda \uparrow}}(\theta_s, \varphi_s) \right\}, \quad (1)$$

式中, λ 为波长, θ_s 为观测天顶角, φ_s 为观测方位角, L_{λ} 为大气层顶 (Top of Atmosphere, TOA) 光谱辐亮度, ε_{λ} 与 T_s 分别为光谱比辐射率及地表温度, B 为普朗克函数, $B_{\lambda}(T_s)$ 是指黑体在温度 T_s 和波长 λ 处的光谱辐亮度, $L_{at_{\lambda \downarrow}}$ 为大气下行辐射, τ_{λ} 为大气透过率, $L_{at_{\lambda \uparrow}}$ 为大气上行辐射。

基于公式(1), MODIS 与 SEVIRI 传感器在波段 i 处的通道辐亮度可分别表示为:

$$L_{i,MODIS} = \left[\varepsilon_{i,MODIS} B_i(T_{s,MODIS}) + (1 - \varepsilon_{i,MODIS}) L_{at_{i \downarrow},MODIS} \right] / \left[\tau_{i,MODIS} + L_{at_{i \uparrow},MODIS} \right], \quad (2)$$

$$L_{i,SEVIRI} = \left[\varepsilon_{i,SEVIRI} B_i(T_{s,SEVIRI}) + (1 - \varepsilon_{i,SEVIRI}) L_{at_{i \downarrow},SEVIRI} \right] / \left[\tau_{i,SEVIRI} + L_{at_{i \uparrow},SEVIRI} \right], \quad (3)$$

式中, $L_{i,MODIS}$ 和 $L_{i,SEVIRI}$ 分别为 MODIS 和 SEVIRI 传感器的通道辐亮度, $\varepsilon_{i,MODIS}$ 和 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 分别表示 MODIS 和 SEVIRI 传感器在波段 i 处的地表比辐射率, B 为普朗克函数, $T_{s,MODIS}$ 和 $T_{s,SEVIRI}$ 分别为 MODIS 和 SEVIRI 传感器观测几何下的地表温度, $L_{at_{i \downarrow},MODIS}$ 和 $L_{at_{i \downarrow},SEVIRI}$ 分别表示 MODIS 和 SEVIRI 传感器在波段 i 处的大气下行辐射, $\tau_{i,MODIS}$ 和 $\tau_{i,SEVIRI}$ 分别表示 MODIS 和 SEVIRI 传感器在波段 i 处的大气透过率, $L_{at_{i \uparrow},MODIS}$ 和 $L_{at_{i \uparrow},SEVIRI}$ 分别表示 MODIS 和 SEVIRI 传感器在波段 i 处的大气上行辐射。

假设地物目标为同温朗伯体并且忽略其比辐射率随时间变化, 经过空间-光谱匹配校准^[28-29]后, 假设不同观测天顶角条件下目标区域地表温度相同, 则 MODIS 与 SEVIRI 传感器的通道辐亮度差异仅由地表比辐射率、大气吸收与散射的路径不同而产生, 联立公式(2)与公式(3)可得:

$$\frac{\varepsilon_{i,SEVIRI}}{\varepsilon_{i,MODIS}} (L_{i,MODIS} - \tau_{i,MODIS} L_{at_{i \downarrow},MODIS} - L_{at_{i \uparrow},MODIS}) = \frac{\tau_{i,MODIS}}{\tau_{i,SEVIRI}} (L_{i,SEVIRI} - \tau_{i,SEVIRI} L_{at_{i \downarrow},SEVIRI} - L_{at_{i \uparrow},SEVIRI}) + \varepsilon_{i,SEVIRI} \tau_{i,MODIS} (L_{at_{i \downarrow},SEVIRI} - L_{at_{i \downarrow},MODIS}), \quad (4)$$

$$b = \frac{\varepsilon_{i,SEVIRI}}{\varepsilon_{i,MODIS}}, \quad (5)$$

由公式(4)和公式(5)可知, 利用 MODTRAN 大气辐射传输模型可以模拟得到 MODIS 及 SEVIRI 传感器各波段的大气透过率、大气下行和上行辐射,

计算获取相对地表比辐射率 b 随观测角度的相对变化量。将互校准之后的 MODIS 和 SEVIRI 数据集按照观测天顶角划分为 $[0^{\circ} \sim 10^{\circ}]$ 、 $[10^{\circ} \sim 20^{\circ}]$ 、 $[20^{\circ} \sim 30^{\circ}]$ 、 $[30^{\circ} \sim 40^{\circ}]$ 、 $[40^{\circ} \sim 50^{\circ}]$ 、 $[50^{\circ} \sim 60^{\circ}]$ 和 $[60^{\circ} \sim 65^{\circ}]$ 七个区间子集, 每个区间子集采用稳健回归的方法, 拟合得到观测角度区间内的相对地表比辐射率 b 。由于 SEVIRI 是静止轨道载荷, 以固定观测角度对地物目标进行成像, 在地物目标比辐射率相对稳定的条件下, 可以忽略 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 随时间的变化量。本文选用 MYD21 地表比辐射率产品, 甄选出 2018-2020 年 MODIS 和 SEVIRI 观测天顶角差异小于 7.5° 、成像时间差异小于 7.5min 且总水汽 (Total Column Water Vapour, TCWV) 含量小于 $1g/cm^2$ 的数据, 计算其均值作为比辐射率初值 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$, 各角度区间子集的 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 相同, 将 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 代入参数 b 得到不同观测角度下的 $\varepsilon_{i,MODIS}$ 。

进一步地, 为了分析反演获得的地表方向性比辐射率随观测天顶角的变化规律, 本文以观测天顶角为自变量, 反演得到的方向性比辐射率 $\varepsilon_{i,MODIS}$ 为因变量, 选用多项式及傅里叶级数参数方程, 拟合出经验性比辐射率方向性模型。具体流程如图 4 所示。

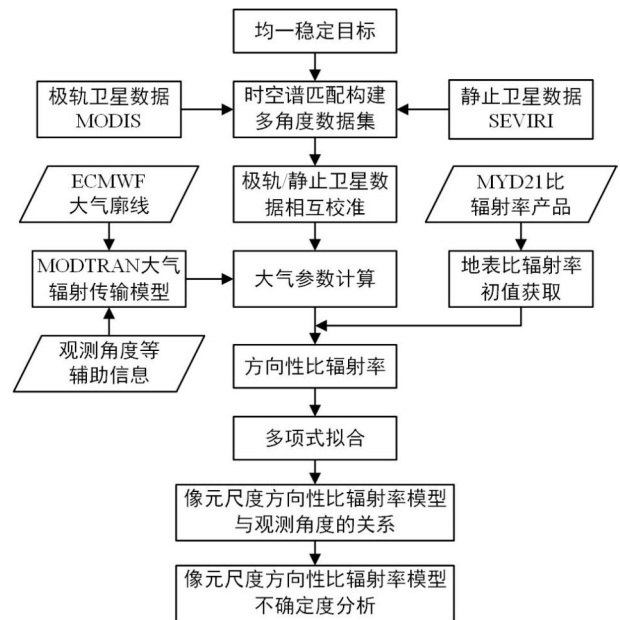


图 4 技术路线示意图

Fig. 4 Technical flow chart

3 结果分析

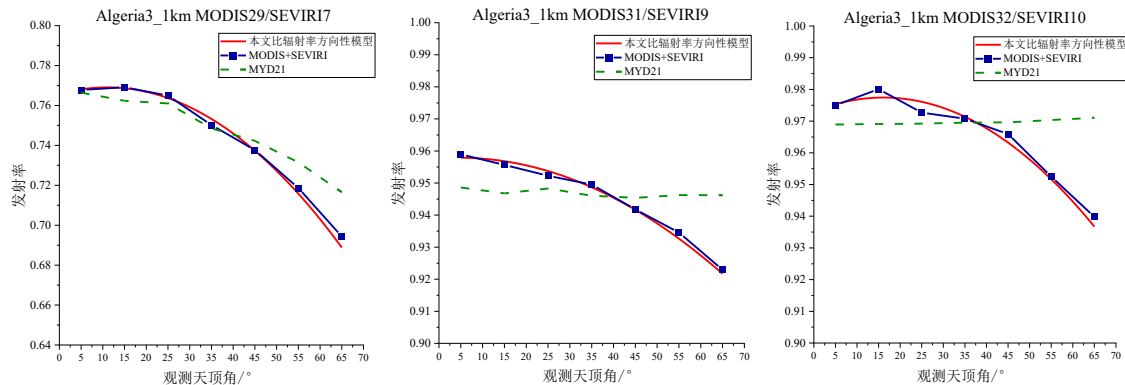
3.1 方向性比辐射率反演结果分析

利用上述方法反演得到的各目标区域方向性

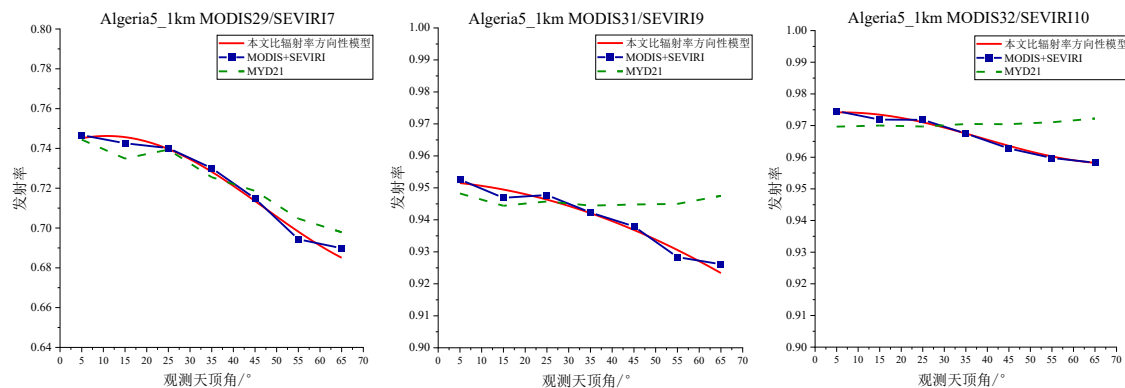
比辐射率如图5所示,反演得到的MODIS 29波段、31波段及32波段比辐射率值分别用 $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$ 表示。结果表明:地表比辐射率方向性效应与波长相关,且 $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 及 $\varepsilon_{MODIS32}$ 均会随着观测天顶角增大而减小;其中, $\varepsilon_{MODIS29}$ 随观测天顶角增大而呈下降的趋势最大,其次为 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$,当观测天顶角范围在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时, $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 及 $\varepsilon_{MODIS32}$ 随观测天顶角的变化较小,当观测天顶角大于 40° 时, $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 及 $\varepsilon_{MODIS32}$ 出现较大的下降趋势,并且在不同波段及目标区域均呈现出较高的一致性,这与Kimes(1983)得到的研究规律一致^[30]。此外,不同目标区域的比辐射率随观测天顶角的变化幅度不同,在 $0 \sim 65^\circ$ 观测天顶角范围内,Algeria3_1km区域比辐射率的方向性效应最小, $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$ 随观测天顶角的变化分别为0.057、0.029和0.015;Mauritania1_1km区域比辐射率的方向性效应最强, $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$ 随观测天顶角的变化可达0.089、0.038和0.033。

为了验证多源传感器法反演得到的方向性比辐射率反演结果的可靠性,本文基于MYD 21地表比辐射率产品提取了各目标区域 $0^\circ \sim 65^\circ$ 观测天顶

角范围内的比辐射率值,并与反演的方向性比辐射率进行比对验证。其中,MODIS 29波段、31波段和32波段MYD 21地表比辐射率值分别用 $\varepsilon'_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon'_{MODIS31}$ 及 $\varepsilon'_{MODIS32}$ 表示。结果表明,对于Algeria3_1km、Algeria5_1km及Libya1_1km区域,在当观测角度为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 时, $\varepsilon_{MODIS29}$ 与 $\varepsilon'_{MODIS29}$ 呈现出了较高的一致性,绝对差异值小于0.006;对于Mauritania1_1km和Mauritania2_1km区域, $\varepsilon_{MODIS29}$ 方向性效应要明显大于 $\varepsilon'_{MODIS29}$,最大绝对差异为0.05,导致这一现象的原因可能是Mauritania1_1km和Mauritania2_1km区域大气水汽含量要高于其余四个区域,满足TCWV小于 $1\text{g}/\text{cm}^2$ 的数据点较少(见表3);此外, $\varepsilon'_{MODIS31}$ 与 $\varepsilon'_{MODIS32}$ 随观测天顶角的变化可以忽略不计,这是由于传统TES算法的经验公式利用比辐射率光谱库拟合得到,从而导致TES算法反演得到地表比辐射率不具备方向性效应^[31]。相比之下,在精确的大气纠正和目标区域热辐射特性均一稳定等条件的基础上,多源传感器法充分利用了极轨和静止轨道卫星载荷多角度辐射差异信息,反演获取的比辐射率随观测角度变化明显。



(a) Algeria3_1km



(b) Algeria5_1km

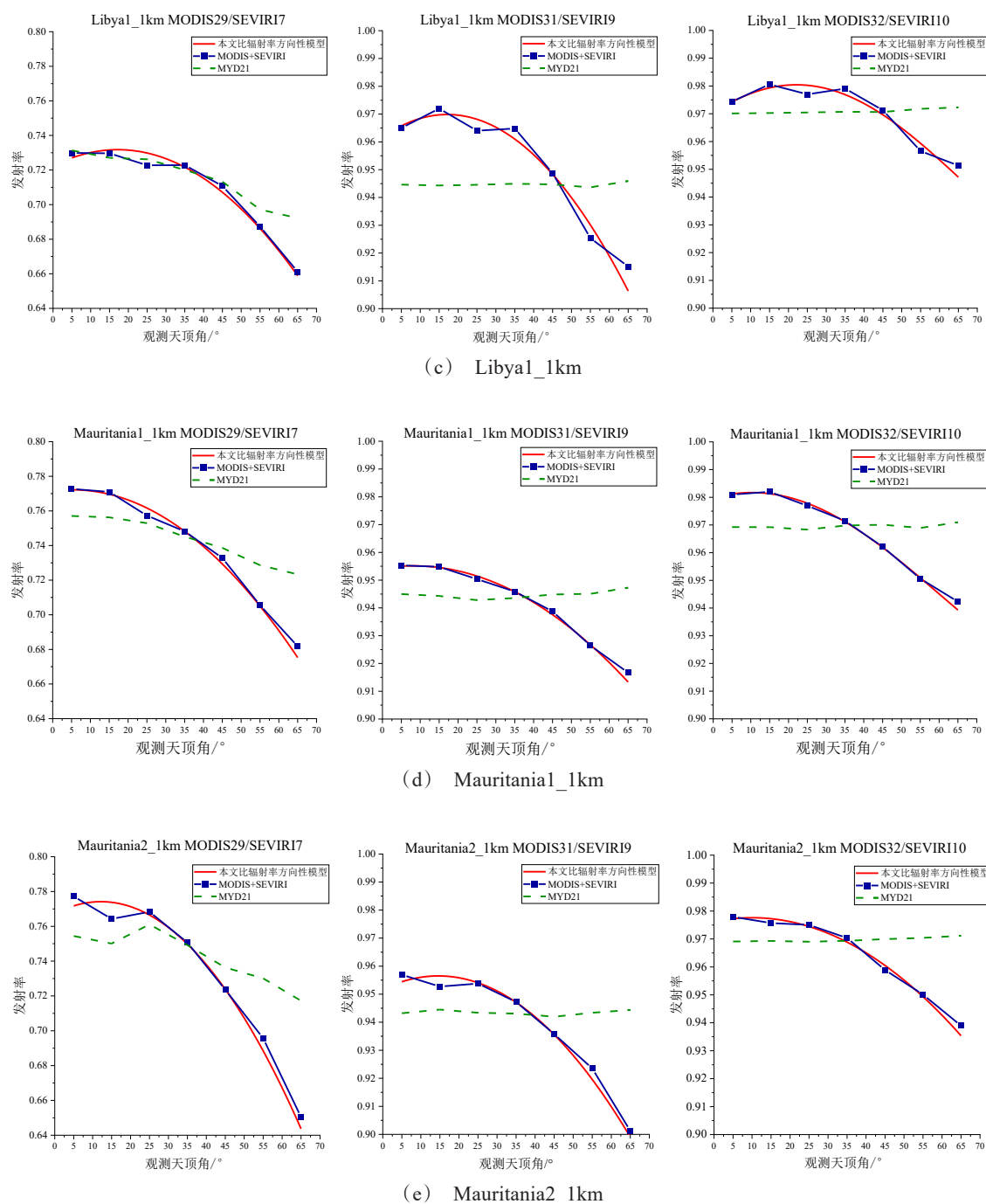


图5 多源传感器法/MYD21方向性比辐射率反演结果及对比

Fig. 5 Multi-source sensor method/MYD21 directional emissivity results and comparison

3.2 经验性比辐射率方向性模型构建结果分析

比辐射率经验性拟合模型的表达式如表4所示,其中, θ 为观测天顶角转化为弧度值。从表中可以看出,除Mauritania2_1 km区域MODIS 29波段拟合的RMSE为0.007 1以外,各目标区域经验性模型拟合的RMSE均小于0.003 4,拟合精度较好。

4 比辐射率方向性模型不确定度分析

本文基于1993年国际标准化组织ISO起草的《测量不确定度表示指南》(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM),通过分析地表比辐射率方向性模型不确定度传递链路,对模型进行不确定度评价^[32]。

表 3 各目标区域不同观测角度区间下的样本数量

Table 3 Number of samples under different viewing zenith angle intervals in each study area

| 观测天顶角 | 0°~10° | 10°~20° | 20°~30° | 30°~40° | 40°~50° | 50°~60° | 60°~65° |
|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Algeira3_1km | 1 294 | 1 382 | 845 | 1 617 | 2 364 | 2 695 | 2 695 |
| Algeira5_1km | 1 286 | 1 450 | 686 | 2 940 | 2 342 | 2 940 | 2 574 |
| Libya1_1km | 1 372 | 837 | 833 | 1 519 | 2 058 | 1 323 | 2 842 |
| Mauritania1_1km | 637 | 476 | 927 | 827 | 1 323 | 1 862 | 1 519 |
| Mauritania2_1km | 637 | 619 | 670 | 815 | 1 315 | 1 503 | 1 911 |

4.1 比辐射率方向性模型不确定度影响因素分析

为了明晰比辐射率方向性模型的不确定度来源,本文绘制了比辐射率方向性模型不确定度树,以多源传感器法不确定度评价方程为主干,梳理和明确引起模型的各不确定度来源,包括:①比辐射率初值误差引入的不确定度, $u(\varepsilon_{SEVIRI}, \theta)$; ②ERA5 大气温湿度廓线误差引入的不确定度, $u(ERA5, \theta)$; ③MODIS 载荷定标误差 $u(MODIS, \theta)$ 和 SEVIRI 载荷定标误差 $u(SEVIRI, \theta)$ 引入的不确定度, $u(SENSOR, \theta)$; ④MODTRAN 大气辐射传输模型误差引入的不确定度, $u(MODTRAN, \theta)$ 。

4.2 比辐射率方向性模型不确定度量化的

4.2.1 比辐射率初值误差引起的不确定度

SEVIRI 比辐射率初值准确性是影响方向性地表比辐射率反演精度的重要因素。基于此,本文以公式(4)为基础,利用误差传递理论,推导了 $\varepsilon_{i,MODIS}$

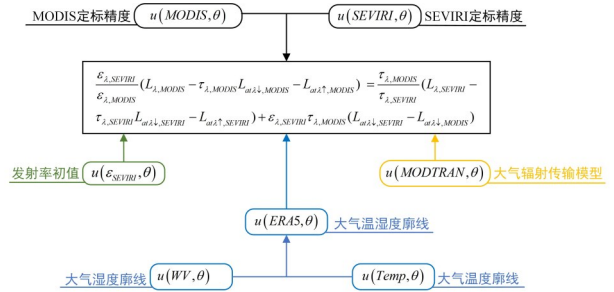


图 6 比辐射率方向性模型不确定度树

Fig. 6 Uncertainty tree of emissivity directional model

和 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 之间的误差传递公式,如公式(6)~(10)所示。

$$\varepsilon_{i,MODIS} = \frac{c}{a + \varepsilon_{i,SEVIRI} \times b} \times \varepsilon_{i,SEVIRI}, \quad (6)$$

$$\delta\varepsilon_{i,MODIS} = \frac{b \times c}{(a + \varepsilon_{i,SEVIRI} \times b)^2} \times \delta\varepsilon_{i,SEVIRI}, \quad (7)$$

$$a = \frac{\tau_{i,MODIS}}{\tau_{i,SEVIRI}} \left(L_{i,SEVIRI} - \tau_{i,SEVIRI} L_{at, \downarrow, SEVIRI} - L_{at, \uparrow, SEVIRI} \right), \quad (8)$$

$$b = \tau_{i,MODIS} \left(L_{at, \downarrow, SEVIRI} - L_{at, \downarrow, MODIS} \right), \quad (9)$$

$$c = \left(L_{i,MODIS} - \tau_{i,MODIS} L_{at, \downarrow, MODIS} - L_{at, \uparrow, MODIS} \right), \quad (10)$$

其中, $\delta\varepsilon_{i,MODIS}$ 和 $\delta\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 分别为 $\varepsilon_{i,MODIS}$ 和 $\varepsilon_{i,SEVIRI}$ 的误差。

MYD21 产品在沙地区域的反演精度优于 0.015^[33]。因此,本文将比辐射率初值误差($\delta\varepsilon_{SEVIRI}$)设置为 0.015,并利用 MODTRAN 大气辐射传输模

表 4 各目标区域经验性比辐射率方向性模型

Table 4 Empirical radiance directional model for each target area

| 目标区域 | 波段 | 经验性模型 | RMSE |
|------------------|----|--|--------|
| Algeria3_1 km | 29 | $\varepsilon(\theta) = 0.00061\theta - 2.758e - 05\theta^2 + 0.7657$ | 0.0023 |
| | 31 | $\varepsilon(\theta) = 8.857e - 05\theta - 9.889e - 06\theta^2 + 0.9577$ | 0.0017 |
| | 32 | $\varepsilon(\theta) = 0.00055\theta - 1.705e - 05\theta^2 + 0.973$ | 0.0003 |
| Algeria5_1 km | 29 | $\varepsilon(\theta) = 0.7102 + 0.03217 \times \cos(w\theta) + 0.01626 \times \sin(w\theta) (w = 0.04325)$ | 0.0034 |
| | 31 | $\varepsilon(\theta) = 0.8159 + 0.1362 \times \cos(w\theta) - 0.01005 \times \sin(w\theta) (w = 0.0091)$ | 0.0019 |
| | 32 | $\varepsilon(\theta) = 0.966 + 0.0078 \times \cos(w\theta) + 0.0024 \times \sin(w\theta) (w = 0.04817)$ | 0.0011 |
| Libya1_1 km | 29 | $\varepsilon(\theta) = 0.0011\theta - 3.194e - 05\theta^2 + 0.7223$ | 0.0034 |
| | 31 | $\varepsilon(\theta) = 0.00095\theta - 2.771e - 05\theta^2 + 0.9617$ | 0.003 |
| | 32 | $\varepsilon(\theta) = 0.9433 + 0.0270 \times \cos(w\theta) + 0.02548 \times \sin(w\theta) (w = 0.0342)$ | 0.003 |
| Mauritania1_1 km | 29 | $\varepsilon(\theta) = 0.00029\theta - 2.721e - 05\theta^2 + 0.7714$ | 0.0029 |
| | 31 | $\varepsilon(\theta) = 0.00021\theta - 1.293e - 05\theta^2 + 0.9543$ | 0.0008 |
| | 32 | $\varepsilon(\theta) = 0.9441 + 0.0357 \times \cos(w\theta) + 0.0118 \times \sin(w\theta) (w = 0.03105)$ | 0.0007 |
| Mauritania2_1 km | 29 | $\varepsilon(\theta) = 0.00114\theta - 4.677e - 05\theta^2 + 0.7672$ | 0.0071 |
| | 31 | $\varepsilon(\theta) = 0.00066\theta - 2.262e - 05\theta^2 + 0.9517$ | 0.0034 |
| | 32 | $\varepsilon(\theta) = 0.00028\theta - 1.397e - 05\theta^2 + 0.9762$ | 0.0015 |

型及大气温湿度廓线,模拟得到大气透过率、大气上行和大气下行等参数,利用公式(7)计算得到不同观测天顶角下比辐射率的不确定度,如图7所示。从图中可以看出, $\delta\epsilon_{29,SEVIRI}$ 、 $\delta\epsilon_{31,SEVIRI}$ 和 $\delta\epsilon_{32,SEVIRI}$ 引起的不确定度均随着观测天顶角增大而减小,且29波段的角度效应最强,32波段的角度效应最弱;由 $\delta\epsilon_{29,SEVIRI}$ 引起的不确定度在1.26%~1.71%之间,由 $\delta\epsilon_{31,SEVIRI}$ 引起的不确定度在1.14%~1.36%之间,由 $\delta\epsilon_{32,SEVIRI}$ 引起的不确定度在1.4%~1.62%之间。

4.2.2 大气温湿度廓线误差引起的不确定度

本文将ERA5大气湿度廓线误差设置为12%^[34-35],大气温湿度廓线误差设置为5 K,将其作为扰动值,重新反演方向性比辐射率,并计算其与 $\epsilon_{MODIS29}$ 、 $\epsilon_{MODIS31}$ 和 $\epsilon_{MODIS32}$ 之间的差异,以此作为大气温湿度廓线误差引起的比辐射率方向性模型不确定度 $u(ERA5, \theta)$,如图8所示。 $u(ERA5, \theta)$ 在各目标区域方向性模型中均随着观测天顶角先减小后增加,存在一个极小值(值接近于0),且极小值与SEVIRI载荷在目标中心区域的观测天顶角一致(见表5),说明大气温湿度廓线对辐射传输的影响与观测天顶角相关。 $u(ERA5, \theta)$ 在到达极小值前下降趋势较缓,在极小值点后则迅速增大,并在观测天顶角

为65°时最大,其最大值可达1.455%。

4.2.3 载荷定标误差引起的不确定度

MODIS与SEVIRI传感器利用星上黑体实现实时在轨定标,具有较高的定标精度,其中,MODIS传感器31波段和32波段定标误差优于0.2 K,29波段定标误差优于0.5 K^[36],SEVIRI传感器7波段、9波段及10波段定标误差优于0.5 K。以此为基础,将其作为载荷亮温扰动值,重新反演方向性比辐射率,并计算其与 $\epsilon_{MODIS29}$ 、 $\epsilon_{MODIS31}$ 和 $\epsilon_{MODIS32}$ 之间的差异,将其作为载荷定标误差引起的比辐射率方向性模型不确定度 $u(MODIS, \theta)$ 和 $u(SEVIRI, \theta)$,分别如图9(MODIS)和图10(SEVIRI)所示。从图中可以看出, $u(SENSOR, \theta)$ 随观测天顶角变化很小,在29波段、31波段及32波段分别为0.56%~1%,0.52%~0.73%和0.52%~0.66%。

4.2.4 MODTRAN辐射传输模型误差引起的不确定度

本文依据MODTRAN5.2大气辐射传输模型用户手册,获悉其不确定度约为1 K,将该值设为扰动量添加到离地辐亮度中,重新反演方向性比辐射率,并计算其与 $\epsilon_{MODIS29}$ 、 $\epsilon_{MODIS31}$ 和 $\epsilon_{MODIS32}$ 之间的差异,将其作为MODTRAN模型自身误差引起的不确定度

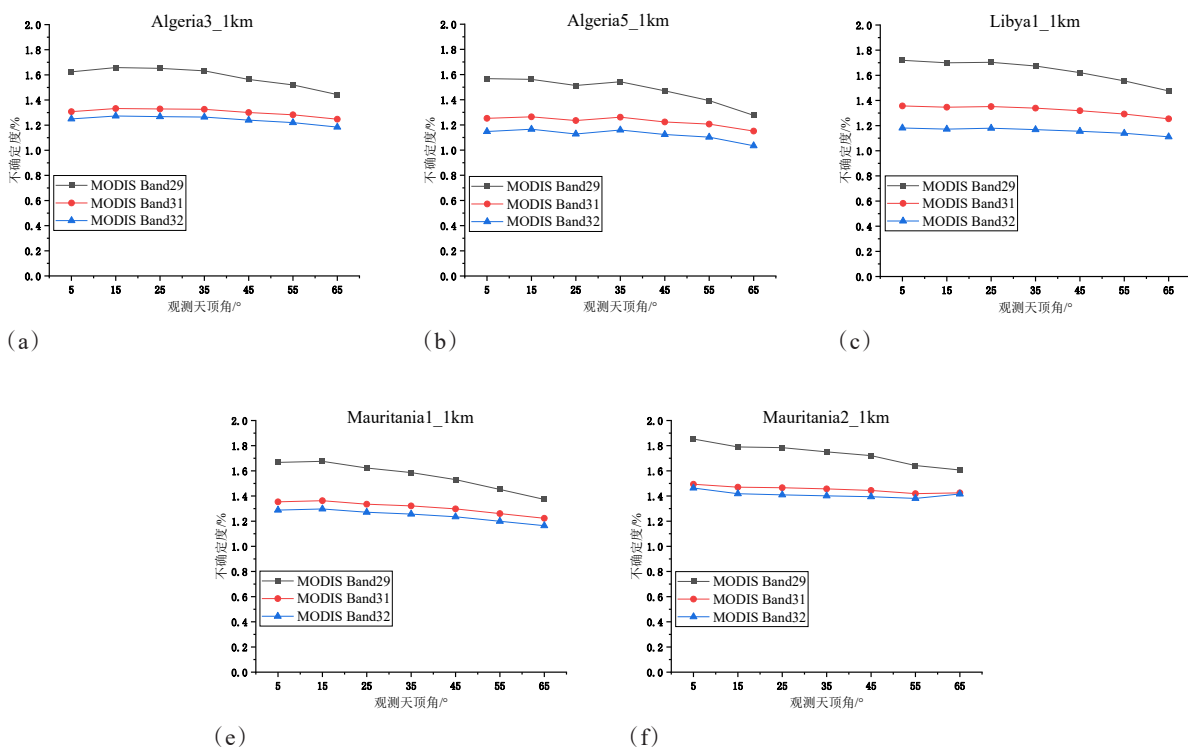


图7 比辐射率初值引起的模型不确定度

Fig. 7 Model uncertainty caused by initial emissivity value

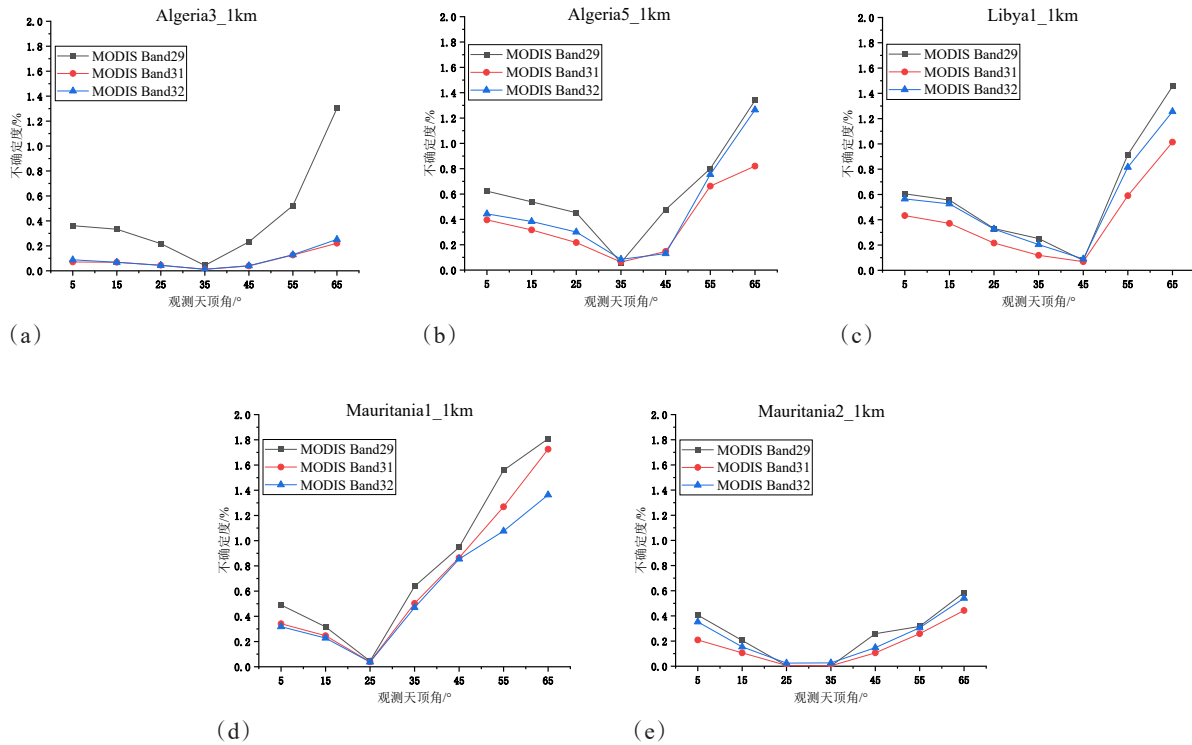


图 8 大气温湿度廓线引起的模型不确定度

Fig. 8 Model uncertainty caused by atmospheric temperature and humidity profiles

表 5 SEVIRI 对各目标区域中心观测天顶角

Table 5 SEVIRI viewing zenith angle at the center of each study area

| 目标区域 | Algeria3_1 km | Algeria5_1 km | Libya1_1 km | Mauritania1_1 km | Mauritania2_1 km |
|----------------|---------------|---------------|-------------|------------------|------------------|
| 中心区域 SEVIRI-RI | 37.5° | 37.8° | 33.3° | 25.4° | 22.8° |
| 观测天顶角 | | | | | |

定度 $u(MODTRAN, \theta)$, 如图 11 所示。从图中可以看出, $u(MODTRAN, \theta)$ 在到达极小值前下降趋势较缓, 在极小值点后则迅速增大, 并在观测天顶角为 65° 时最大; $u(MODTRAN, \theta)$ 在 MODIS 29 波段、31 波段及 32 波段分别优于 0.59%, 0.29% 和 0.35%。

4.2.5 模型总体不确定度

假设各不确定度因素之间相互独立, 根据误差传递理论, 计算得到比辐射率方向性模型的总不确定度 $u(\varepsilon_\theta)$, 如公式(11)所示。

$$u(\varepsilon_\theta) = \sqrt{u^2(\varepsilon_{SEVIRI, \theta}) + u^2(ERA5, \theta) + u^2(SENSOR, \theta) + u^2(MODTRAN, \theta)} \quad (11)$$

不同观测天顶角下模型总不确定度如图 12 所

示。将 SEVIRI 在各目标中心区域的观测天顶角视为参考值, 当观测天顶角小于参考值时, $u(\varepsilon_\theta)$ 随观测天顶角无明显变化, 当观测天顶角大于参考值时, 各目标区域模型不确定度随观测天顶角逐渐增大(除 Algeria3_1km 区域)。整体来看, Mauritania1_1km $u(\varepsilon_\theta)$ 最大, 其在 $0\sim 65^\circ$ 观测天顶角下分别为 1.76%~2.43% (MODIS 29 波段), 1.45%~2.19% (MODIS 31 波段) 和 1.40%~1.89% (MODIS 32 波段); Algeria3_1km $u(\varepsilon_\theta)$ 最小, 其在 $0\sim 65^\circ$ 观测天顶角下分别为 1.72%~2.06% (MODIS 29 波段), 1.39%~1.45% (MODIS 31 波段) 和 1.35%~1.41% (MODIS 32 波段)。MODIS 影像的空间分辨率会随着观测天顶角的增大而下降, 从而降低了 SEVIRI 与 MODIS 像元空间匹配的精度, 这一现象可能是造成比辐射率反演结果的不确定度随观测天顶角增大的原因之一。

5 结论

本文综合利用长时序静止轨道载荷 MSG/SEVIRI 和极地轨道载荷 AQUA/MODIS 多角度观测信息, 对 Algeria3_1km、Algeria5_1km、Libya1_1km、Mauritania1_1km 及 Mauritania2_1km 5 个定标场进行了不

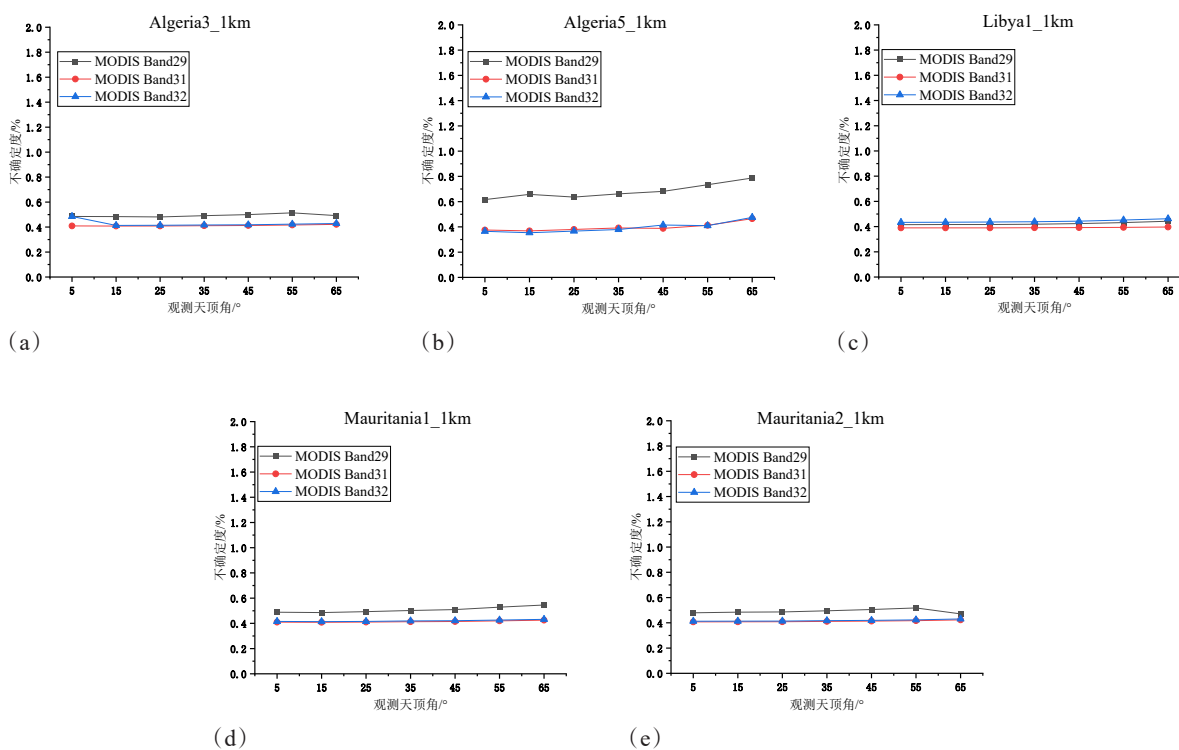


图 9 MODIS 定标引起的模型不确定度
Fig. 9 Model uncertainty caused by MODIS sensor calibration

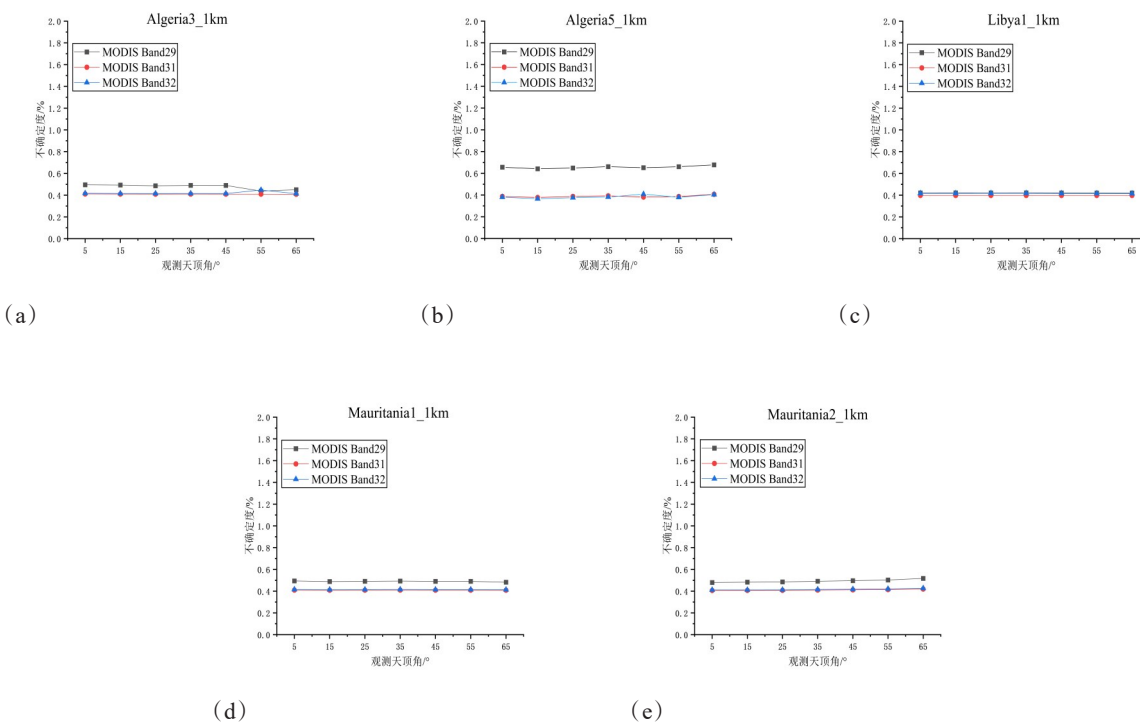


图 10 SEVIRI 载荷定标引起的不确定度
Fig. 10 Uncertainty caused by SEVIRI sensor calibration

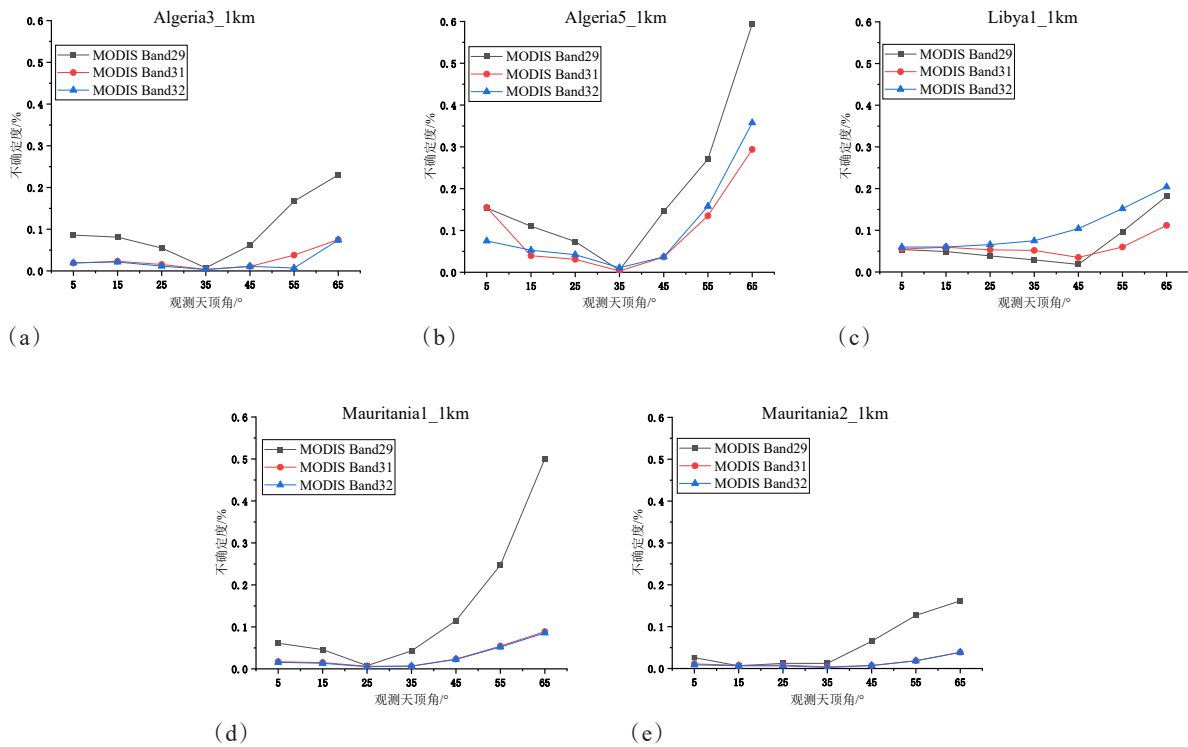


图 11 MODTRAN 辐射传输模型引起的不确定度
Fig. 11 Uncertainty caused by radiative transfer model

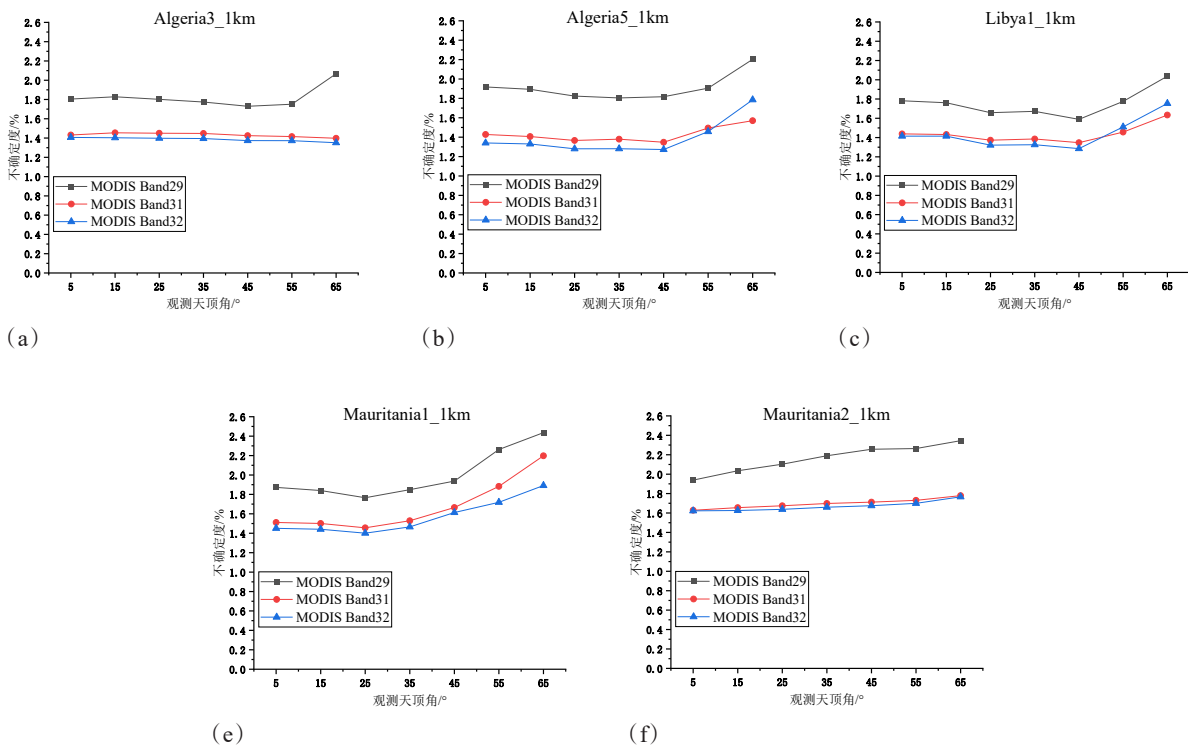


图 12 各观测角度下比辐射率方向性模型总不确定度
Fig. 12 Total uncertainty of radiance directional model at each viewing zenith angle

同观测天顶角下地表比辐射率反演,探索了比辐射率随观测角度的变化规律,分析了各目标区域在MODIS不同波段比辐射率的方向性效应,构建了公里级像元尺度地表比辐射率方向性模型,并基于误差传递理论对模型不确定度进行了系统评估,为开展红外载荷定标与产品真实性检验提供支撑。具体为:

(1) 方向性比辐射率均随着观测天顶角的增大呈下降趋势。在 $0\sim 40^\circ$ 观测天顶角范围内,方向性比辐射率随观测天顶角的变化较小,而当观测天顶角大于 40° 时,方向性比辐射率呈急速下降趋势;

(2) 方向性比辐射率随观测天顶角的变化与波长相关, $\varepsilon_{MODIS29}$ 随观测天顶角下降速度最快,其次为 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$;

(3) 不同目标区域方向性比辐射率随观测天顶角的变化幅度不同,在观测角度 $0\sim 65^\circ$,Algeria5_1km比辐射率的方向性效应最小, $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$ 随观测天顶角的变化分别为0.057、0.029和0.015;Mauritania1_1km比辐射率方向性效应最强, $\varepsilon_{MODIS29}$ 、 $\varepsilon_{MODIS31}$ 和 $\varepsilon_{MODIS32}$ 随观测天顶角的变化可达0.089、0.038和0.033;

(4) 各目标区域比辐射率方向性模型不确定度均随观测天顶角的增大而增大,模型不确定度均优于3%。

综上所述,本文构建的比辐射率方向性模型可应用于红外载荷定标与地表温度产品真实性检验,但仍存在不足以待后续改进,诸如,地表方向性比辐射率反演精度依赖于大气纠正精度、仅针对下垫面为沙地、戈壁的目标区域进行模型构建,因此,下一步将针对茂密植被、水体等目标开展研究,同时进一步提升大气纠正精度,以提升比辐射率方向性模型精度并拓展其适用范围。

References

- [1] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems [J]. *Remote sensing reviews*, 1995, **12**(3-4): 225-253.
- [2] García-Santos V, Coll C, Valor E, et al. Analyzing the anisotropy of thermal infrared emissivity over arid regions using a new MODIS land surface temperature and emissivity product (MOD21) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **169**: 212-221.
- [3] Li Z L, Wu H, Wang N, et al. Land surface emissivity retrieval from satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(9-10): 3084-3127.
- [4] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1998, **36**(4): 1113-1126.
- [5] Jin M, Liang S. An improved land surface emissivity parameter for land surface models using global remote sensing observations [J]. *Journal of Climate*, 2006, **19**(12): 2867-2881.
- [6] Han Q J, Liu L, Fu Q Y, et al. Vicarious calibration of multiple sensors based on reanalysis data of pseudo-invariant site [J]. *ACTA METEOROLOGICA SINICA*, 2014, **34**(11): 315-321.
- [7] Coll C, Caselles V, Valor E, et al. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces [J]. *Remote sensing of environment*, 2007, **110**(2): 162-175.
- [8] Cao B, Liu Q, Du Y, et al. Modeling directional brightness temperature over mixed scenes of continuous crop and road: A case study of the Heihe River Basin [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, **12**(2): 234-238.
- [9] Gastellu-Etchegorry J P, Lauret N, Yin T, et al. DART: recent advances in remote sensing data modeling with atmosphere, polarization, and chlorophyll fluorescence [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, **10**(6): 2640-2649.
- [10] Ermida S L, DaCamara C C, Trigo I F, et al. Modelling directional effects on remotely sensed land surface temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **190**: 56-69.
- [11] Cao B, Liu Q, Du Y, et al. A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: Historical development, current status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **232**: 111304.
- [12] Ermida S L, Trigo I F, Hulley G, et al. A multi-sensor approach to retrieve emissivity angular dependence over desert regions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **237**: 111559.
- [13] Bacour C, Briottet X, Bréon F M, et al. Revisiting Pseudo Invariant Calibration Sites (PICS) over sand deserts for vicarious calibration of optical imagers at 20 km and 100 km scales [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(10): 1166.
- [14] Cosnefroy H, Leroy M, Briottet X. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**(1): 101-114.
- [15] Choi T J, Xiong X, Angal A, et al. Assessment of the spectral stability of Libya 4, Libya 1, and Mauritania 2 sites using Earth Observing One Hyperion [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, **8**(1): 083618.
- [16] Fu Q, Min X, Li X, et al. In-flight absolute calibration of the CBERS-02 CCD sensor at the Dunhuang test site [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2006, **10**(4): 433. (傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 等. 敦煌场地 CBERS-02 CCD 传感器在轨绝对辐射定标研究 [J]. *遥感学报*), 2006 (04): 433-439.
- [17] Li C, Xue Y, Liu Q, et al. Post calibration of channels 1 and 2 of long-term AVHRR data record based on SeaWiFS data and pseudo-invariant targets [J]. *Remote sensing of environment*, 2014, **150**: 104-119.

- [18] Neigh C S R, McCorkel J, Campbell P K E, *et al.* Monitoring orbital precession of EO-1 Hyperion with three atmospheric correction models in the Libya-4 PICS [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, **13** (12): 1797-1801.
- [19] Bannari A A B, Omari K, Teillet P M, *et al.* Multisensor and multiscale survey and characterization for radiometric spatial uniformity and temporal stability of Railroad Valley Playa (Nevada) test site used for optical sensor calibration [C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII. SPIE, 2004, **5234**: 590-604.
- [20] He L L. Evaluation and Radiometric Calibration Application of Pseudo-Invariant Calibration Sites (PICS) in Northwest China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2020.(何灵莉. 我国西北准不变定标场(PICS)的选取评价和辐射定标应用[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2020.
- [21] Ren H. Modelling of directional thermal radiation and angular correction on land surface temperature from space [D]. Université de Strasbourg, 2013.
- [22] Jiang G M, Jin Y Q. Intercalibration of SVISRR/FY-2 Thermal Infrared Channels with AIRS/Aqua Channels [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, **27** (4): 504-510.(蒋耿明, 金亚秋. 中国风云二号 SVISRR 传感器热红外波段与 AIRS/Aqua 的交叉辐射定标[J]. *遥感技术与应用*), 2012, **27**(4): 504-510.
- [23] Ying W M, Wu H. Estimation of net surface shortwave radiation from MODIS/AQUA [J]. *China Agricultural Informatics*, 2019, **31**(01): 24-34.(应王敏, 吴骅. 基于 MODIS/AQUA 数据的地表短波净辐射反演[J]. *中国农业信息*), 2019, **31**(01): 24-34.
- [24] Hulley G, Malakar N, Freepartner R. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature and emissivity product (MxD21) algorithm theoretical basis document collection-6 [J]. *JPL Publication*, 2016: 12-17.
- [25] Ren H, Yan G, Chen L, *et al.* Angular effect of MODIS emissivity products and its application to the split-window algorithm [J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2011, **66**(4): 498-507.
- [26] Gao C, Li Z L, Qiu S, *et al.* An improved algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from MSG-2/SEVIRI data [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2013, **52**(6): 3175-3191.
- [27] Fang H L. Retrieval of land surface parameters from geostationary satellite data: An overview of recent developments [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25** (01): 109-125.(方红亮. 基于地球静止气象卫星的地表参数遥感研究进展[J]. *遥感学报*), 2021, **25**(01): 109-125.
- [28] Gao C, Jiang X, Li X, *et al.* The cross-calibration of CBERS-02B/CCD visible-near infrared channels with Terra/MODIS channels [J]. *International journal of remote sensing*, 2013, **34**(9-10): 3688-3698.
- [29] Liu J X, Gao C X, Yang Z W, *et al.* Cross-calibration for Thermal Infrared Channels of FY-4A/AGRI Sensor Based on AQUA/MODIS [J]. *Radio Engineering*, 2021, **51** (12): 1373-1381.(刘佳欣, 高彩霞, 杨治伟, 等. 基于 AQUA/MODIS 的 FY-4A/AGRI 传感器热红外通道交叉辐射定标方法[J]. *无线电工程*), 2021, **51**(12): 1373-1381.
- [30] Kimes D S. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**(1): 33-55.
- [31] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, *et al.* A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1998, **36**(4): 1113-1126.
- [32] Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [J]. *Iso Tag4*, 1995.
- [33] Hulley G C, Hughes C G, Hook S J. Quantifying uncertainties in land surface temperature and emissivity retrievals from ASTER and MODIS thermal infrared data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117** (D23).
- [34] Ma L, Zhao Y, Woolliams E R, *et al.* Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(11): 1696.
- [35] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote sensing of environment*, 1998, **66**(1): 1-16.
- [36] Chander G, Xiong X J, Choi T J, *et al.* Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(4): 925-939.