

典型陆表稳定目标热红外辐射特性分析及适用性评估

杨治纬^{1,2}, 高彩霞¹, 邱实¹, 马灵玲¹, 钱永刚¹, 赵永光¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院 中国科学院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049

摘要: 以地面稳定目标为参考的网络化定标技术已经成为国际定标领域的研究热点。它利用多次观测的方式减小独立测量不确定性, 不仅可极大提升定标校验频次, 还可有效提高总体定标精度。基于此, 本文利用长时间序列 Aqua/MODIS 和 Landsat 8/TIRS 热红外数据, 对国际卫星对地观测委员会定标与真实性检验组 6 个伪不变定标场、敦煌定标场以及格尔木大灶火地区的地表热辐射及大气特性进行了系统性分析, 建立了热红外陆表稳定目标甄选标准, 即空间亮温标准差低于 0.3 K, 发射率时间变异系数低于 2%, 旨在甄选适用于热红外载荷网络化定标的陆表参考目标, 以支持热红外载荷在轨辐射定标精度的提升。结果表明: 在 1 km 空间尺度下满足甄选标准的区域分别为: Libya1_1 km、Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km、敦煌_1 km 及格尔木_1 km, 其中, Libya4_1 km 面积最大, 为 75 km×75 km; 格尔木_1 km 面积最小, 为 3 km×3 km; 对于 100 m 空间尺度, 在 Libya1_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km 以及敦煌_1 km 共甄选出 7 个满足阈值的区域, 最大面积为 30 km×30 km, 最小面积为 5 km×5 km; Libya1_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km 以及敦煌_1 km 目标区域的空间均一性受空间尺度影响较小, 适用于多种空间分辨率热红外载荷定标与真实性检验。

关键词: 热红外, 空间异质性, 时间稳定性, MODIS, Landsat 8, ECMWF

中图分类号: P2

引用格式: 杨治纬, 高彩霞, 邱实, 马灵玲, 钱永刚, 赵永光. 2023. 典型陆表稳定目标热红外辐射特性分析及适用性评估. 遥感学报, 27(5): 1133-1149

Yang Z W, Gao C X, Qiu S, Ma L L, Qian Y G and Zhao Y G. 2023. Analysis of the thermal infrared radiation characteristics of a typical land surface stable target and applicability assessments. National Remote Sensing Bulletin, 27(5): 1133-1149 [DOI: 10.11834/jrs.20221791]

1 引言

高精度的载荷定标是保证热红外载荷获取数据精准性、稳定性的关键一环。除天上搭载黑体外, 以地面为参照目标的场地替代定标和交叉定标是开展热红外载荷在轨定标及载荷辐射性能长期稳定性监测的重要手段, 也是目前国际定标领域研究热点 (高彩霞等, 2013; 李元等, 2009)。当前, 热红外载荷场地替代定标的参考目标通常选取发射率接近 1 的大面积内陆水体 (张勇等, 2016), 例如中国的青海湖以及美国的加利福尼亚

州的太浩湖 (Lake Tahoe) 等。然而, 湖泊区域全年晴空天数较少, 且不少湖泊存在较长的冰冻期, 无法满足高频次遥感定标需求 (郑小兵, 2014)。与场地定标技术相比, 交叉辐射定标无需建立地面校正场就可进行多传感器卫星数据之间的标定。其优点是定标成本较低, 可以实现高频次、多传感器间的辐射定标, 且不易受天气等条件的制约。交叉辐射定标已经成为传统发射前定标和场地定标的有益补充, 成为目前确保星载传感器获取高精度观测辐射值的最有效方法之一 (高彩霞等, 2013)。2005 年世界气象组织和气象卫星协调组织

收稿日期: 2021-12-02; 预印本: 2022-03-16

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2018YFB0504800, 2018YFB0504804)

第一作者简介: 杨治纬, 研究方向为热红外遥感。E-mail: yangzhiwei19@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 高彩霞, 研究方向为定标与真实性检验, 热红外定量遥感。E-mail: gaocaixia@aoc.ac.cn

发起国际计划“全球天基交叉定标系统”GSICS (Global Space-based Inter-Calibration System), 旨在通过对国际业务运行的极轨和静止轨道卫星载荷进行交叉定标, 将它们统一到通用参考标准上, 确保不同卫星部门管理的不同传感器在不同时间和位置进行的卫星观测具有可比性 (Mitchell 等, 2007)。GSICS 采取星下点 SNO (Simultaneous Nadir Overpass) 的方式, 要求严格的时空谱角匹配, 以消除因时空谱角多观测要素差异带来的目标热辐射差异, 导致交叉匹配点集中在地球两极, 目标种类单一, 满足匹配条件的观测数据往往仅占总量的 0.1%。因此, 在全球范围内甄选具备不同下垫面、不同大气类型的热红外载荷在轨定标的地面参考目标, 增加定标样本, 是进一步提升热红外载荷在轨辐射精度的关键。

国际上, 为了实现航天光学遥感载荷辐射定标场地资源共享, 国际卫星对地观测委员会 CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) 定标与验证工作组 WGCV (Working Group on Calibration and Validation) 选择了 49 个陆地辐射定标场地纳入其合作框架, 统称为 CEOS 参考标准测试场, 并经过近 10 年的大量数据分析, CEOS/WGCV 确定了 6 个伪不变场 PICS (Pseudo Invariant Calibration Sites), 即 Algeria3, Algeria5, Libya1, Libya4, Mauritania1, Mauritania2。这些 PICS 均分布在非洲沙漠地区, 在可见—近红外谱段—短波红外, 其场地均一性优于 3%, 时间稳定性为 2%—3%, 已被用于 MODIS (Terra/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、EO-1 (Earth Observing Satellite One) /ALI (Advanced Land Imager)、Sentinel 2A/MSI (Multi Spectral Instrument)、NPP/VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 等可见光—近红外谱段光学载荷辐射定标及辐射性能稳定性评估 (Wu 等, 2010; Gyanesh 等, 2010; Neigh 等, 2016; Barsi 等, 2018), 以及开展传感器之间的交叉验证。此外, 2001 年中国建成敦煌辐射定标场, 并于 2008 年被纳入 CEOS 陆地辐射定标场, 主要用于高分、资源、风云 (FY) 等系列卫星载荷可见—近红外谱段—短波红外光学载荷的辐射定标。由于 CEOS 6 个 PICS 以及中国敦煌辐射定标场甄选初衷是面向可见光—近红外谱段遥感载荷定标, 它们对于热红外载荷辐射定标的适用性还有待进一步的分析和论证。基于此, 本文利用长时间序列

的 Aqua/MODIS、Landsat 8/TIRS 热红外数据以及欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 大气再分析数据 ERA5 (Reanalysis v5), 对 CEOS/PICS、敦煌辐射定标场以及格尔木大灶火的地表热辐射及大气特性进行系统性分析, 探讨其作为红外载荷定标场的可行性, 并给出每个研究区域对于热红外载荷辐射定标的适用性, 以支持热红外载荷在轨辐射定标研究。

2 目标区域及数据描述

2.1 目标区域介绍

20 世纪 90 年代开始, 国际上开展了大量 PICS 甄选与特性分析研究, 通过对近 15 年的地表、空间、光谱、双向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 以及大气稳定等特性分析, 进行了 PICS 的筛选。2008 年在美国召开的 CEOS 可见光红外定标技术工作组 IVOS (Infrared Visible Optical Sensors) 会议上, CEOS 发布了 6 个 PICS。这 6 个 PICS 均位于撒哈拉沙漠, 分别为 Algeria3、Algeria5、Libya1、Libya4、Mauritania1 及 Mauritania2, 各个辐射定标场的中心位置、面积大小如表 1 所示。这 6 个 PICS 的下垫面均为复合沙丘, 且地表光谱特性非常稳定, 在可见光到近红外的谱段 (400—2500 nm) 空间均一性与时间稳定性均优于 3% (Cédric 等, 2019; Cosnefroy 等, 1996; Choi 等, 2014), 气候干燥, 大气通透性良好。CEOS/PICS 场已被广泛用于美国 Aqua、Terra、Landsat 及 EO-1 和 NOAA 及法国 SPOT 和 POLDER 等多颗卫星的反射谱段光学遥感载荷辐射定标验证和辐射特性稳定性分析, 以及遥感载荷之间的交叉定标 (Li 等, 2014; Neigh 等, 2016; Barsi 等, 2018)。

作为中国可见光—短波红外光学载荷辐射定标的主要场地, 敦煌辐射定标场, 场地面积约为 40 km×30 km, 整个区域较为平坦, 场地地物覆盖度单一且稳定, 主要由混合的粘土砂砾等构成; 其地表光谱特性稳定, 在可见光到近红外谱段场地的空间均一性与时间稳定性分别优于 2% 和 3% (傅俏燕 等, 2006; 何积泰和陆亦怀, 1997), 已支持高分、资源、风云等系列卫星载荷的长期业务化定标工作。此外, 何灵莉等 (2020) 在中国

西北地区进行了 PICS 场地甄选, 确定了位于格尔木市中心西部 60 km 处均匀区域, 其地表类型为沙地, 场地面积大小为 10 km×10 km。

表 1 各目标区域中心坐标以及 2018 年—2020 年 MODIS、Landsat 8 无云影像数量

Table 1 Central coordinates of each target area and number of cloud free images of MODIS and Landsat 8 from 2018 to 2020

场地名称	经度/(°)	纬度/(°)	无云数据(MODIS)	无云数据(Landsat 8)	区域面积/km ²
Libya1	13.35	24.42	582	32	50×50
Libya4	23.39	28.55	587	36	75×75
Algeria3	7.66	30.32	542	33	75×75
Algeria5	2.23	31.02	542	31	75×75
Mauritania1	-9.30	19.40	523	27	50×50
Mauritania2	-8.78	20.85	520	28	75×75
敦煌	94.25	40.14	411	26	40×30
格尔木大灶火	94.19	36.43	152	25	10×10

2.2 数据介绍

(1) Aqua/MODIS 卫星数据。Aqua/MODIS 具备 1—2 d 对地观测一次的能力, 拥有 36 个中等分辨率 (0.25—1 μm) 的光谱通道, 光谱范围为 0.4—14 μm , 热红外通道有 8 个。本文选用 2018 年—2020 年空间分辨率为 1 km 的 MYD02_1KM 辐亮度数据, 进行辐射定标场空间均一性的评价。在此基础上, 本文选用 2018 年—2020 年空间分辨率为 1 km 的 MYD21 地表发射率产品以分析目标发射率时间稳定性。该产品由温度与发射率分离算法 TES (Temperature and Emissivity Separation method) 生产 (Hu 等, 2019), 其反演的地表发射率考虑了观测天顶角的影响, MODIS 29 通道发射率随观测角度变化可达 0.038, 相对的, MODIS 31 与 32 通道的变化均小于 0.01 (García-Santos 等, 2015);

MODIS 29 通道对下垫面为裸地的反演精度约为 0.03, 相比之下, MODIS 31、32 通道的反演精度优于 0.015 (Hulley 等, 2012)。综合考虑观测角度效应以及反演精度等因素, 本文仅选用 MODIS 31、32 通道发射率数据分析地表的时间稳定性。此外, 本文还选用了 MYD03 地理格网数据以及 MYD35 云掩膜数据, 进行无云数据筛选及数据裁剪与重采样等预处理工作。

(2) Landsat 8/TIRS 卫星数据。Landsat 8/TIRS 回访周期为 16 d, 光谱范围为 10.60—12.51 μm , 拥有两个热红外通道, 分别为 10 通道 (10.9 μm) 以及 11 通道 (12 μm), 空间分辨率为 100 m。本文选用 2018 年—2020 年 Landsat 8/TIRS 第 10 通道的影像, 以分析不同空间尺度下目标空间均一性变化。

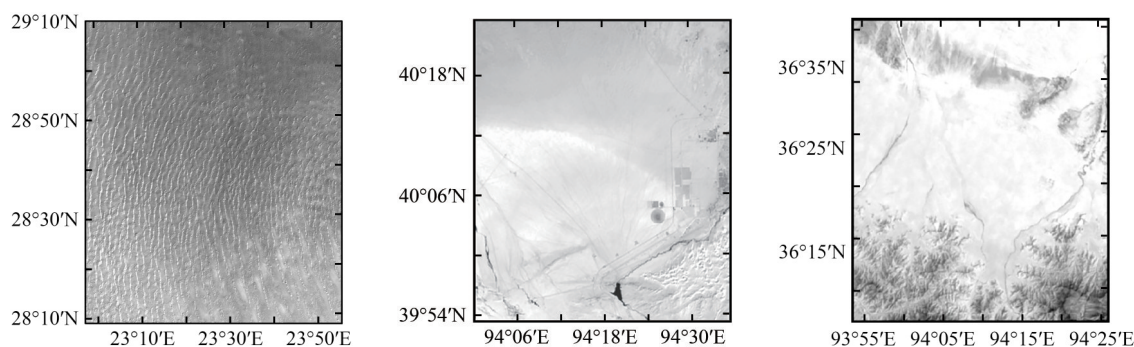


图 1 Libya4、格尔木大灶火及敦煌场 Landsat8 10 通道卫星影像

Fig. 1 Landsat 8 satellite band 10 image of Libya4, Geermu Dazaohuo and Dunhuang

(3) ECMWF大气数据。ECMWF ERA5为最新一代再分析数据, ERA5数据集能够提供从1979年至今大量的大气参数、地表参数以及海表面参数数据, 其空间分辨率为 0.25° 、时间分辨率为1 h。本文从ERA5数据集提取2018年—2020年各场云量TCC (Total Cloud Cover)、水汽TCWV (Total Column Water Vapour)、及臭氧 O_3 (Ozone) 等大气参数。此外, 由于ERA5数据集中没有气溶胶光学厚度AOD (Aerosol Optical Depth) 这一数据, 本文从EAC4 (ECMWF CAMS global reanalysis data) 数据集提取了2018年—2020年各场AOD数据, 其空间分辨率为 0.75° , 时间分辨率为3 h, 以支持对各场地大气AOD、 O_3 、TCWV、TCC含量、季节性效应以及年变化量的分析。

3 多尺度目标热辐射特性评价方法

本文采用多尺度均一目标评价方法对稳定目标热辐射的空间均一性以及时间稳定性进行综合分析。首先, 使用MYD21地表发射率数据对各个场地进行时间稳定性的分析; 此外, 为了降低地表温度和发射率分离过程中算法误差对均一性分析的影响, 本文使用MYD02_1KM大气表观辐亮度TOA Radiance (Top of Atmosphere Radiance) 进行空间均一性评价, 甄选出时间变异系数CV (Coefficient of Variation) 优于2%以及亮温标准差SD (Standard Deviation) 优于0.3 K的区域。在此基础上, 使用空间分辨率为100 m的Landsat 8/TIRS TOA辐亮度数据, 在空间分辨率为100 m以及500 m (由空间分辨率为100 m的Landsat 8/TIRS数据降采样而来) 这两个空间尺度下对所筛选区域进行空间均一性分析, 进一步甄选出满足空间亮温SD优于0.3 K的区域。最后, 使用ERA5数据集中TCWV、TCC、 O_3 以及EAC4数据集中AOD大气参数, 对各场地以上大气参数的年变化量、月均值以及季节性效应进行综合分析。

3.1 数据预处理

为了避免云覆盖对热红外辐射特性评价结果的影响, 本文使用MODIS MYD35云掩膜产品对MYD02_1KM与MYD21数据进行云检查, 筛选出目标区域上空无云数据 (Aqua MODIS以及Landsat 8 TIRS无云数据量分别见表2.1第3列及第4列);

由于MODIS影像会随着观测天顶角的增大而产生一定程度的畸变, 为了消除这种畸变带来的影响, 使用MODIS重投影工具MRT Swath (MODIS Reprojection Swath Tool) 以WGS-84为坐标系对目标区域内的MODIS无云数据进行裁剪与重投影, 处理后的数据空间分辨率为1 km。此外, 针对大气自身辐射及其消光效应对评价结果的影响, 本文选用了ERA5再分析数据集中大气温湿度廓线, 并采用线性插值的方法对相邻时刻的两个大气参数进行插值来获取卫星成像时刻的大气参数, 利用MODTRAN5.2 (Moderate resolution atmospheric Transmission model Version 5.2) 大气辐射传输模型来开展Aqua MODIS和Landsat 8 TIRS热红外数据的大气纠正, 从而消除大气透过率和上行辐射的影响, 获取离地辐射等效亮温, 用于地表空间均一性分析。其中, 气溶胶模型选用MODTRAN自带的“沙漠型”, 大气模型根据卫星过境时间的不同选择“中纬度夏季型”或“中纬度冬季型”。对于空间分辨率为100 m的无云Landsat 8 TIRS 10通道BOA数据进行降采样, 得到空间分辨率为500 m的数据, 进行空间尺度特性分析。

3.2 空间均一性分析

本文使用滑动窗口法进行目标空间均一性分析, 计算过程如图2所示; 选取窗口大小对应空间范围为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$, 滑动步长为1 km, 即当像元空间分辨率为1 km时, 对应滑动窗口的大小为 3×3 像元, 滑动步长为1个像元; 同时, 计算滑动窗口内所有像元亮温SD, 将该值赋予中心像元。通过对8个目标区域2018年—2020年无云的Aqua MODIS以及Landsat 8 TIRS无云影像采用上述方法进行处理, 得到不同空间分辨率下 (1 km、500 m、100 m) 的空间亮温SD影像。由于不同影像间的成像时间、卫星观测天顶角及地表的物理特性不同, 导致在相同空间尺度下, 同一目标的亮温SD在不同影像上可能出现较大的变化。因此, 为了得到最可靠的空间亮温SD, 对2018年—2020年所有的空间亮温SD影像求平均, 计算得到目标区域每个像元时间维度上亮温SD的平均值, 并以此来表征地表的空间均一性。考虑到红外载荷高精度定标需求 (1—1.5 K), 并同时兼顾甄选目标区域面积, 本文将亮温SD阈值设置为0.3 K。

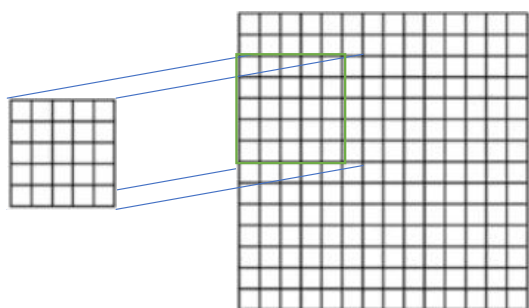


图2 滑动窗口法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sliding window method

3.3 发射率时间稳定性分析

地表发射率时间稳定性表征了一个采样点(如一个像素点)在整个时间序列中相对其发射率均值的异变程度。本文选用变异系数这一指标进行发射率时间稳定性评价,如式(1)。

$$CV = 100 \times \frac{s}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中, s 为长时间序列卫星影像目标像元发射率的标准差, \bar{x} 为目标像元发射率的平均值。CV 值与目标区域的变化程度成正比, CV 的值越小则表示目标区域的时间稳定性越高。

国内外研究人员已经在可见光到近红外波段使用时间 CV 进行了大量稳定区域筛选的工作: Gu 等(1990)基于 SPOT HRV 影像使用时间 CV 对 La Crau 场地的时间稳定性进行了分析,并以 2% 的阈值筛选出场地中最稳定的区域; Vincent 等基于时间跨度为 25 年的 Landsat/TM 影像,对位于土耳其的 Tuz Gölü 地区(北纬: 38.5° , 东经 33.2°)的时间稳定性进行了分析,并以 3% 的阈值筛选出了 $330 \text{ m} \times 770 \text{ m}$ 最优的区域(Odongo 等, 2014); 何灵莉等(2020)使用 MODIS MCD43C1 BRDF 模型参数日产品对中国西北地区进行了时间稳定性的分析,并选用时间 CV 为 3% 的阈值筛选时间稳定的区域。此外,考虑到 MODIS MYD21 产品的第 31 以及 32 通道发射率精度优于 0.015 (Hulley 等, 2012),以时间 CV 为 2% 作为阈值,进行目标区域时间稳定性的甄选。基于上述国内外研究人员设置的选场阈值,本文以时间 CV 为 2% 为阈值进行时间稳定性的甄选。

3.4 选场评价指标

具备空间均一性的目标区域不一定具备发射率时间稳定性(反之亦然),并且同一目标区域在

不同的空间尺度下,其空间均一性可能有很大的变化(Bannari 等, 2004)。因此,本文综合考虑目标发射率时间稳定性、空间稳定性等因素,针对不同空间分辨率遥感载荷的适用性,提出了以下甄选标准:

(1) 针对空间分辨率为 1 km 及以下的场地: 基于空间分辨率为 1 km 的遥感数据,选取空间亮温 SD 小于 0.3 K 且时间 CV 小于 2% 的计算结果,筛选出研究区同时具备时空稳定性和空间均一性的场地;

(2) 针对空间分辨率为 100 m 及 500 m 的场地: 基于 Landsat 8/TIRS 遥感数据,选取在较高空间尺度(100 m、500 m)下空间亮温 SD 小于 0.3 K 的计算结果,筛选出较高空间尺度下具备空间均一性的场地。

4 目标热辐射特性及大气参数评价结果

4.1 目标热辐射特性评价结果及分析

根据 3.1—3.3 节的数据预处理及多级地表热辐射特性评价方法,本文对 2018 年—2020 年 MODIS 传感器获取的 8 个目标区域的 MYD02_1KM 和 MYD21 数据进行计算,得到其年均空间亮温 SD 与时间 CV 影像,如图 4 及图 5 所示。在 1 km 的空间尺度下,在 MODIS 29 通道计算得到空间亮温 SD 要明显高于 MODIS 31 以及 32 通道; Libya4 与 Algeria3 在 MODIS 29、31 及 32 通道的空间亮温 SD 均优于 0.3 K,呈现出了较高的空间均一性。Libya1、Algeria5、Mauritania1 与 Mauritania2 在 MODIS 31 以及 32 通道也有着较高的空间均一性,而在 MODIS 29 通道,Libya1 南部及 Mauritania2 北部存在条带状高空间异质性区域,Algeria5 与 Mauritania1 南部存在诸多圈状的高空间异质性区域;敦煌场中心沙地区域在 MODIS 29、31 及 32 通道下均呈现出较高的空间均一性,而其余区域的空间异质性较高。格尔木大灶火区域整体的空间异质性较高,仅存在一个 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 大小的区域空间亮温 SD 低于 0.3 K。MODIS 32 通道的时间 CV 在整体上优于 MODIS 31 通道;此外,满足空间稳定性阈值的区域与时间稳定性阈值的区域有着较大范围的重叠,但也存在一些差异。这表明在热红外波段,具备空间均一性的区域不一定具备时间稳定的特性,

也说明了同时进行空间均一性及时间稳定性场地评估的必要性。在 MODIS 31 通道下, Algeria5 中部区域时间 CV 较高; 格尔木大灶火南部及西北

部区域的时间 CV 较高, 且 MODIS 32 通道要高于 31 通道; 此外, 其余 6 个区域均具备较高的时间稳定性。

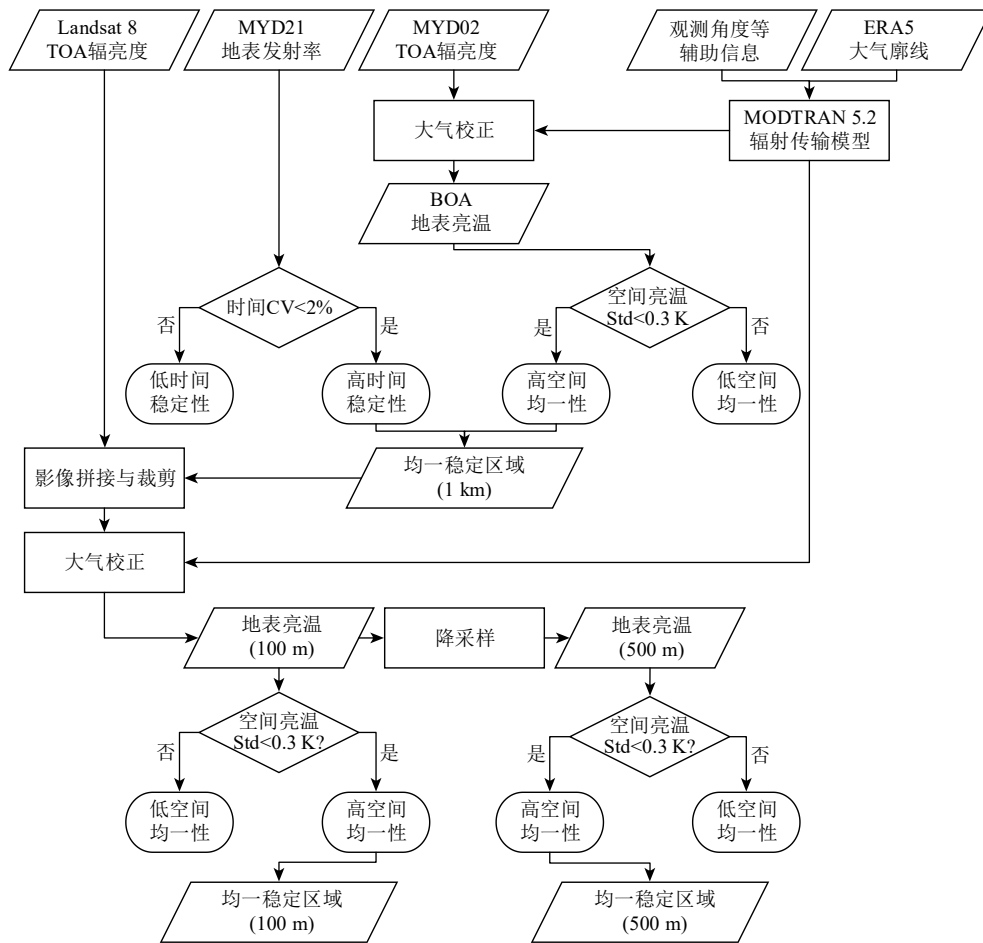


图3 热红外波段均一、稳定目标甄选流程图

Fig. 3 Flowchart of identifying spatial uniform and time stable region of thermal infrared spectrum

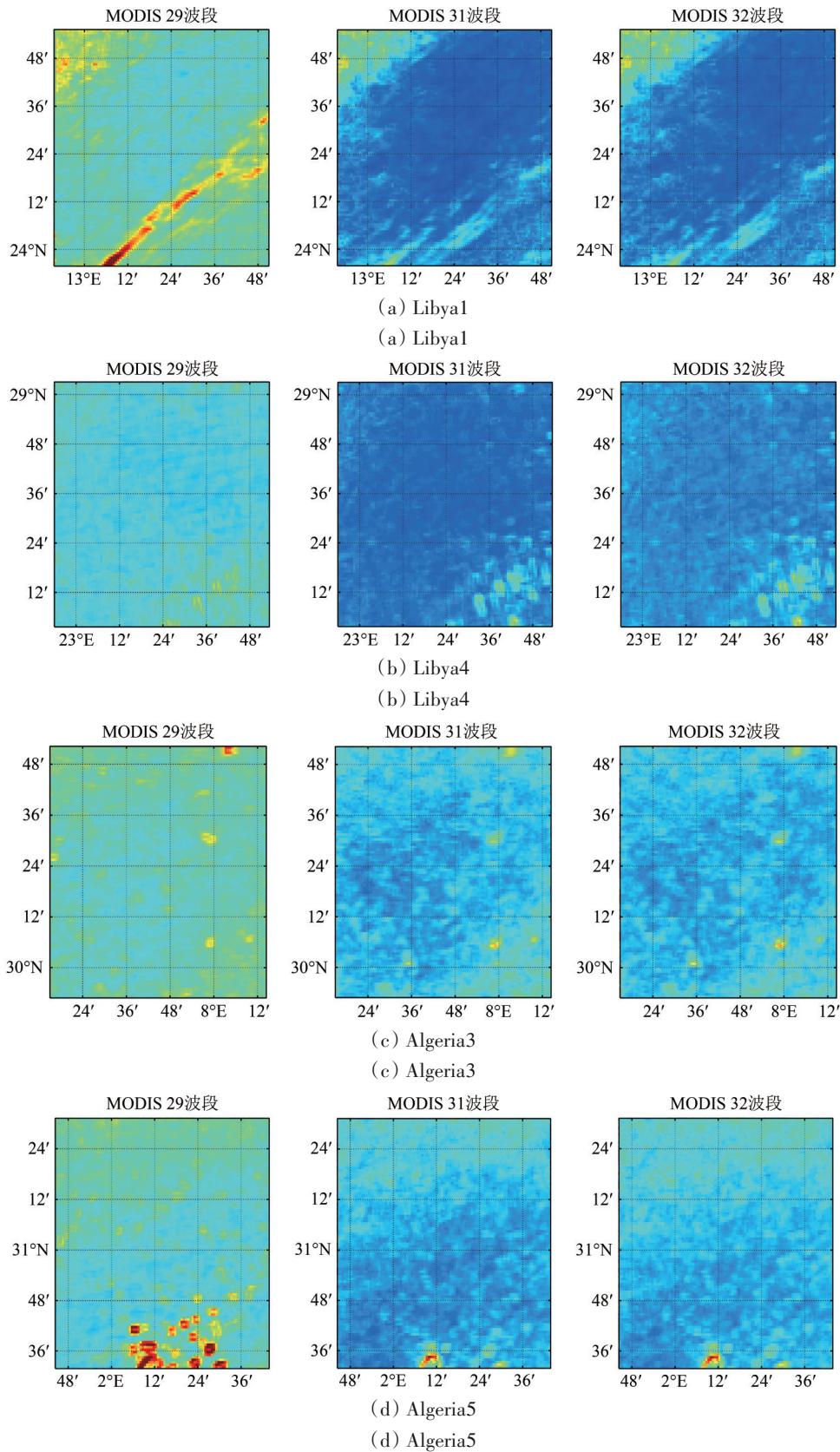
本文选用空间亮温 SD 0.3 K 以及时间 CV 2% 为阈值, 进行热红外波段辐射定标区域的初筛选, 在 8 个目标区域中甄选出满足阈值的最大区域。初步甄选出的区域名称、中心坐标以及区域面积如表 2 所示。在热红外波段 1 km 的空间尺度下, 6 个 PICS 符合甄选标准的区域面积广阔, 区域面积均大于 30 km×30 km。格尔木大灶火整体的空间均一性较低, 仅存在一块大小为 3 km×3 km 的区域同时满足甄选标准。

自然地物的含水量、地表温度及物质构成等物理因素会随着季节的变化而改变, 即所谓的季节性效应。为综合性分析初步甄选出的 Libya1_1 km、Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km、敦煌_1 km 以及格尔木_1km 区域空间均一性的季节性效应,

本文统计了 2018 年—2020 年每个区域的空间亮温 SD 均值, 绘制时间序列图, 如图 6 所示。结果表明: 在热红外波段, 以上 8 个目标区域的空间均一性均呈现出一定的季节性效应, 在秋冬两季要优于春夏两季。其中 Mauritania1_1km、Mauritania2_1 km、敦煌_1 km 以及格尔木_1 km 区域空间均一性的季节性效应较为明显: 以 MODIS 29 通道为例, 以上 4 个区域的空间亮温 SD 由不同季节导致的最大差异依次为: 0.11 K、0.08 K、0.15 K 和 0.13 K。Libya1、Libya4、Algeria3 以及 Algeria5 的空间均一性没有明显的季节性效应。各目标区域的空间均一性在 MODIS 不同的热红外通道呈现出了不同的特性: 从整体上来看, 各区域的空间均一性在 MODIS 32 以及 31 通道要优于 MODIS 29 通道, 然而在空间均一性较低的观测影像上 (多出

现于夏季), 29通道则要优于32以及32通道。这
表明地表空间均一性在MODIS 29通道受环境因素

影响要小于MODIS 31以及32通道, 具备更好的稳
定性。



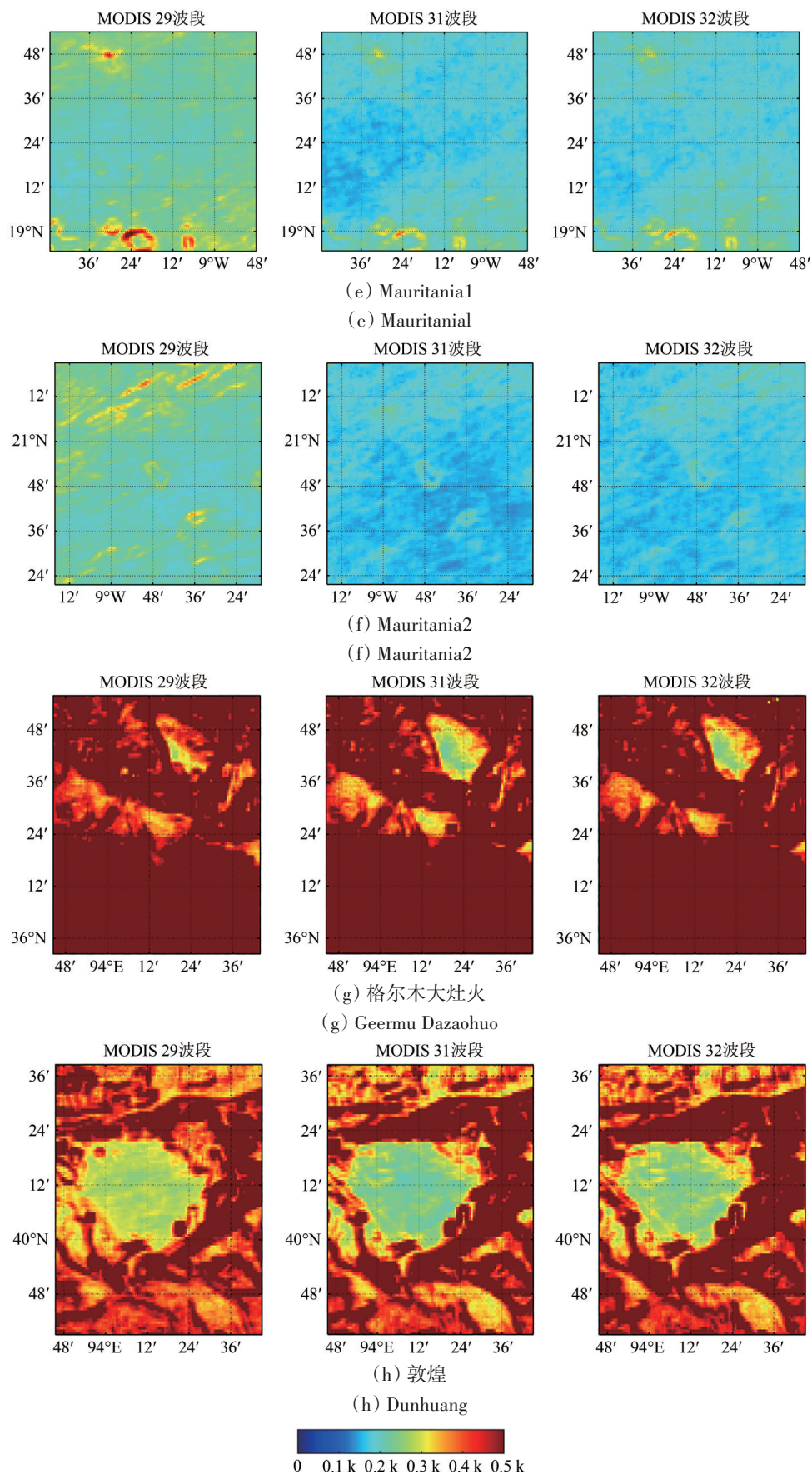


图4 基于2018年—2020年MYD02_1KM数据1 km空间尺度下的空间亮温标准差均值
 Fig. 4 the mean value of spatial brightness temperature standard deviation at 1 km spatial resolution based on MYD02_1KM data from 2018 to 2020

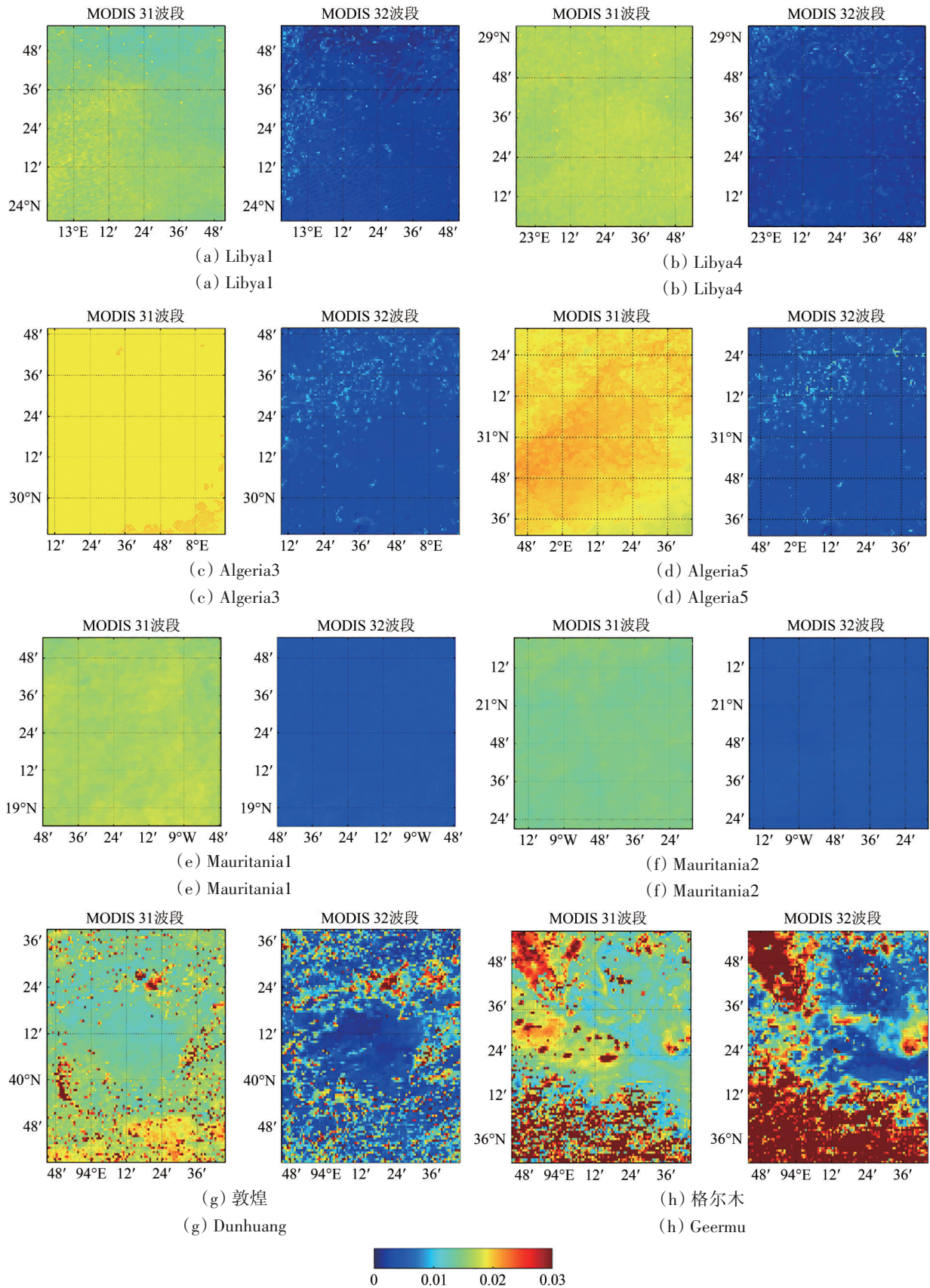


图5 基于2018年—2020年MYD21数据1 km空间尺度下的时间变异系数
Fig. 5 Time variation coefficient at 1 km spatial resolution based on MYD21 data from 2018 to 2020

表2 1 km 空间尺度下满足甄选标准的目标区域

Table 2 Target area meeting the criterion at 1 km spatial resolution

场地名称	经度/(°)	纬度/(°)	区域面积/km ²	场地名称	经度/(°)	纬度/(°)	区域面积/km ²
Libya1_1 km	13.35	24.12	50×50	Mauritania1_1 km	-9.20	19.60	50×50
Libya4_1 km	23.39	28.55	75×75	Mauritania2_1 km	-8.63	20.70	50×50
Algeria3_1 km	7.74	30.37	70×70	敦煌_1 km	94.25	40.14	15×15
Algeria5_1 km	1.88	31.37	30×30	格尔木_1 km	94.31	36.63	3×3

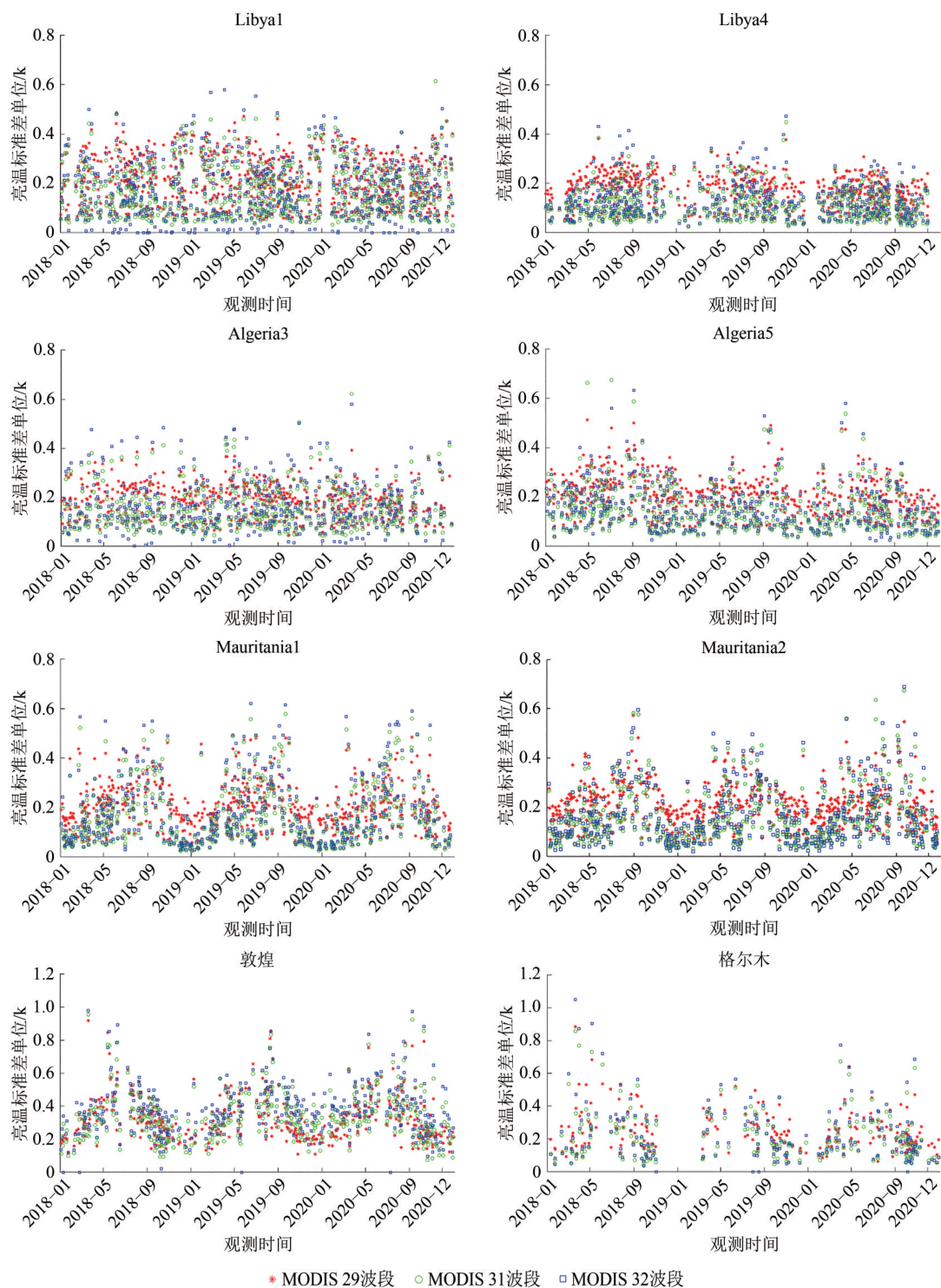


图6 MODIS 29、31和32通道区域地表亮温标准差均值的时序图

Fig. 6 Time series diagram of mean value of surface brightness temperature standard deviation in MODIS band

4.2 大气特性评价结果及分析

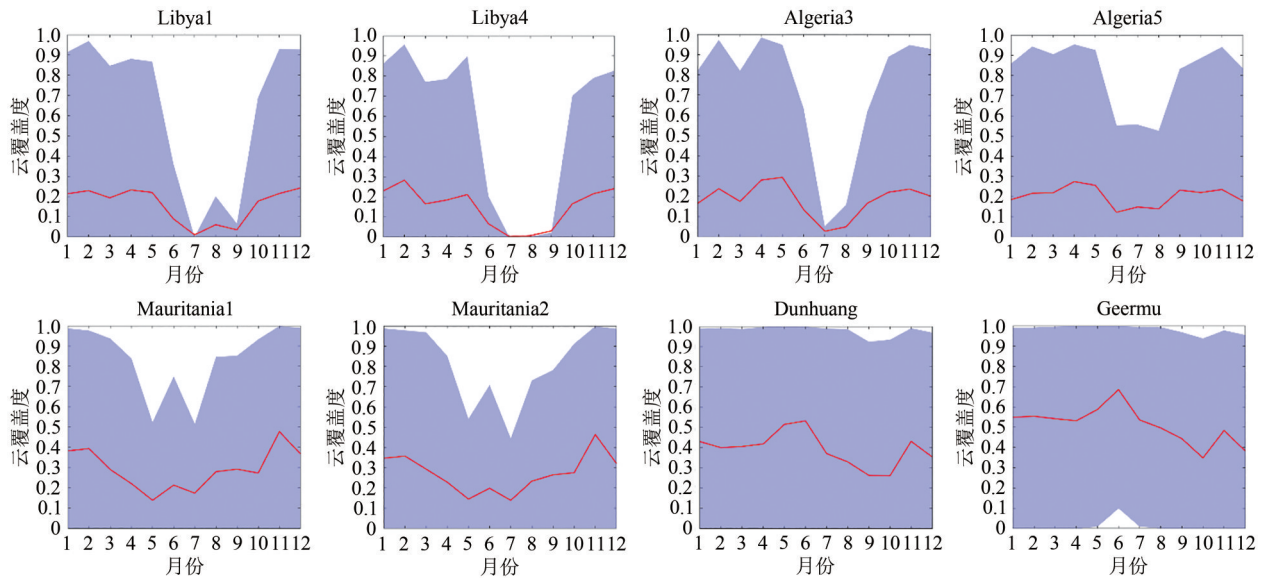
在场地替代及交叉定标中需要利用辐射传输模型来实现天基与地基观测之间的辐射传递,而在热红外8—14 μm 波段,影响辐射衰减最主要的大气因子为TCWV、 O_3 及AOD(魏合理和戴聪明,2014)。因此,本文利用2018年—2020年ERA5 TCWV、 O_3 、TCC以及EAC4 AOD数据,分析其月均值、月10%分位值,月90%分位值及季节性变化,以定量分析各个场地大气参数的变化情况,其结果如图7所示。图中红线为各个月份数据均值,紫色区域表示10%分位数到90%分位数。结果表明:如图7(a)所示,8个目标区域的TCC月10%分位数均接近0(或为0),这保证了所有目标区域每个月都有无云影像;CEOS/PICS的TCC月90%分位数呈现出明显的季节性变化,其在7月份达到最低点,其中,Libya1、Libya4以及Algeria3的TCC含量接近0,这也表明了PICS的年最佳观测时间窗口在夏季。相比之下,格尔木大灶火地区及敦煌辐射定标场的TCC月90%分位数值则全年接近1,无明显季节性变化。如图7(b)所示,8个目标区域的TCWV呈现出了相同的年变化趋势:在夏季达到最大值,在冬季达到最小值,这可能与各季节温度相关;格尔木大灶火地区的TCWV最小,表明该区域适用于水汽较为敏感的数据分析及真实性检验。如图7(c)所示,各个目标区域的AOD年变化趋势相似,均在春或夏季达到峰值。格尔木大灶火的AOD含量在所有目标区域中最低,除4、5月份外其AOD月均值均小于0.2,这可能与该区域的海拔高度较高有关;Mauritania1、Mauritania2以及敦煌定标场的AOD含量较高,敦煌辐射定标场的AOD 90%分位数达到了1,而Mauritania1与Mauritania2的AOD月均值在6、7月份达到最大值(高于0.6)。如图7(d)所示,所有目标区域大气 O_3 含量季节性周期变化大约为均值的10%,这说明大气中 O_3 含量比较稳定。Mauritania1、Mauritania2以及Libya1的大气 O_3 含量在夏季较高,其余6个目标区域则在冬季达到

峰值。

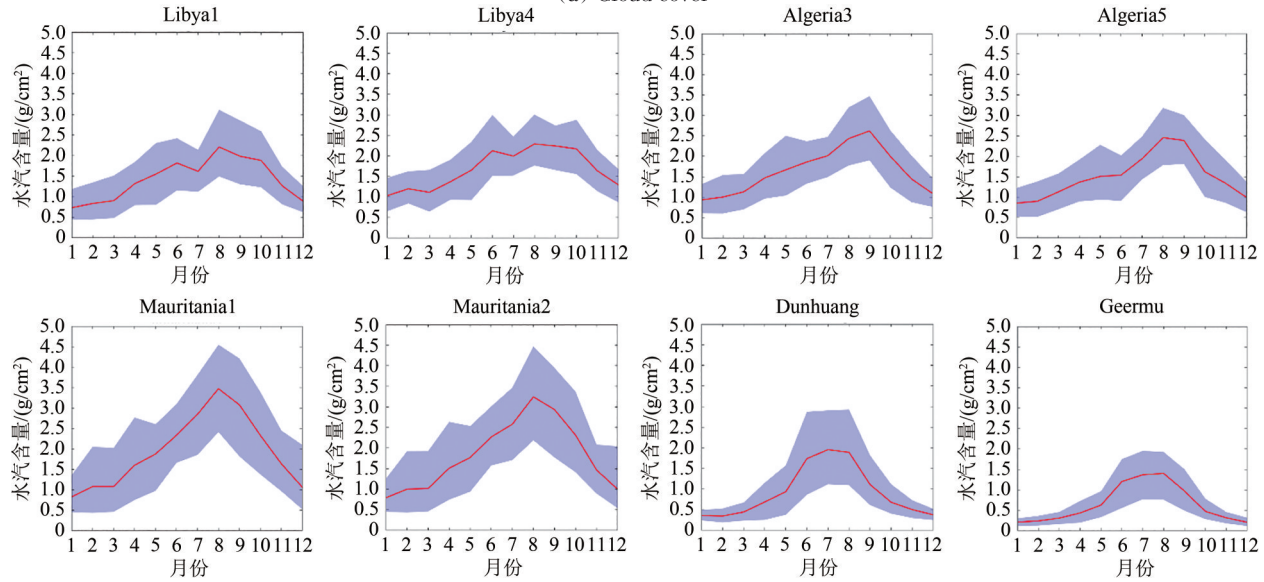
4.3 多级分辨率地表均一性分析

为了进一步分析Libya1_1 km、Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km、敦煌_1 km及格尔木_1 km在较高空间尺度下的空间均一性,本文选用3.2节介绍的空间均一性评价方法,对2018年—2020年Landsat 8 TIRS 10通道的影像数据进行计算,得到空间分辨率100 m及500 m下的空间亮温SD均值,如图8所示。结果表明:与1 km空间尺度下的结果相比,Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km、格尔木_1 km在100 m以及500 m空间尺度下的空间异质性大幅增加;而Libya1_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km以及敦煌_1 km在这两个空间尺度下依然有着较高的空间均一性。其中Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km、格尔木_1 km在100 m空间尺度下整体的空间亮温SD较高,不存在满足甄选标准的区域;在500 m空间尺度下,仅Libya4_1 km存在两块面积为5 km \times 5 km及6 km \times 6 km满足甄选阈值的区域。Libya1_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km及敦煌_1 km整体空间亮温SD较低,在100 m及500 m空间尺度下满足标准的区域见表3。

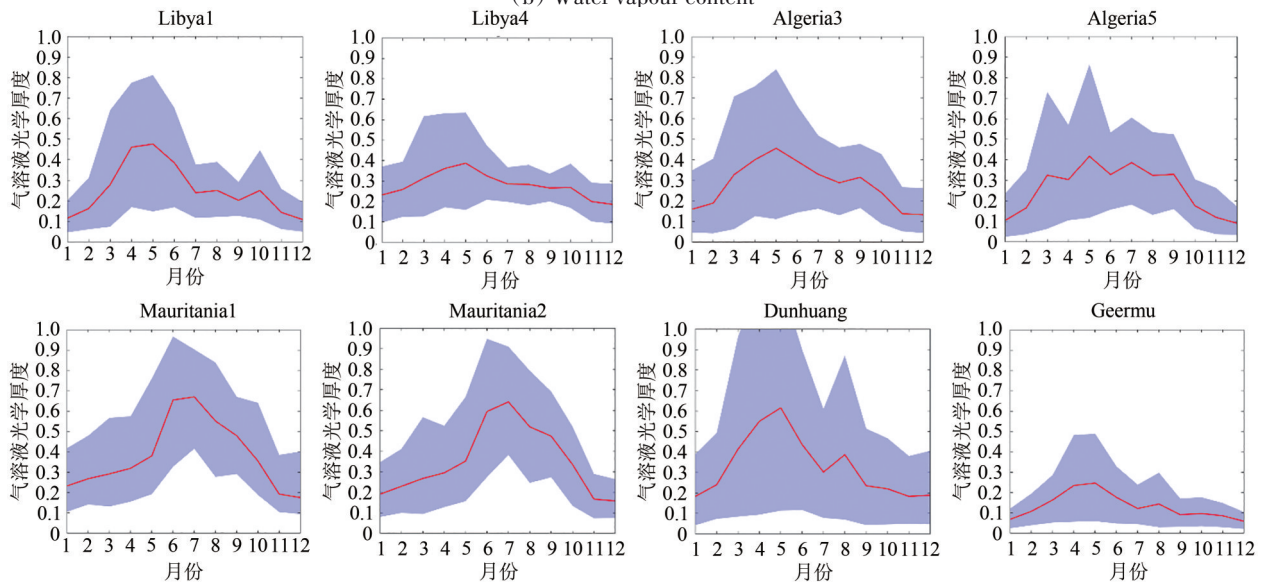
为了定量分析各目标区域空间亮温SD随空间尺度的变化,本文将空间分辨率为100 m的空间亮温SD影像降采样到500 m,并与原空间分辨率为500 m空间亮温SD影像做差,得到差值影像,该差值影像的百分比统计折线图如图9所示。结果表明:Libya1_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km及敦煌_1 km等区域由空间尺度导致的空间亮温SD变化较小,相比空间尺度500 m的亮温SD,以上4个区域100 m的亮温SD平均升高0.076 K、0.034 K、0.065 K以及0.050 K。相比之下,Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km及格尔木_1 km等目标区域的空间亮温SD在100 m以及500 m这两个空间尺度上呈现出了较大的差异:亮温SD平均升高0.163 K、0.237 K、0.158 K与0.11 K。



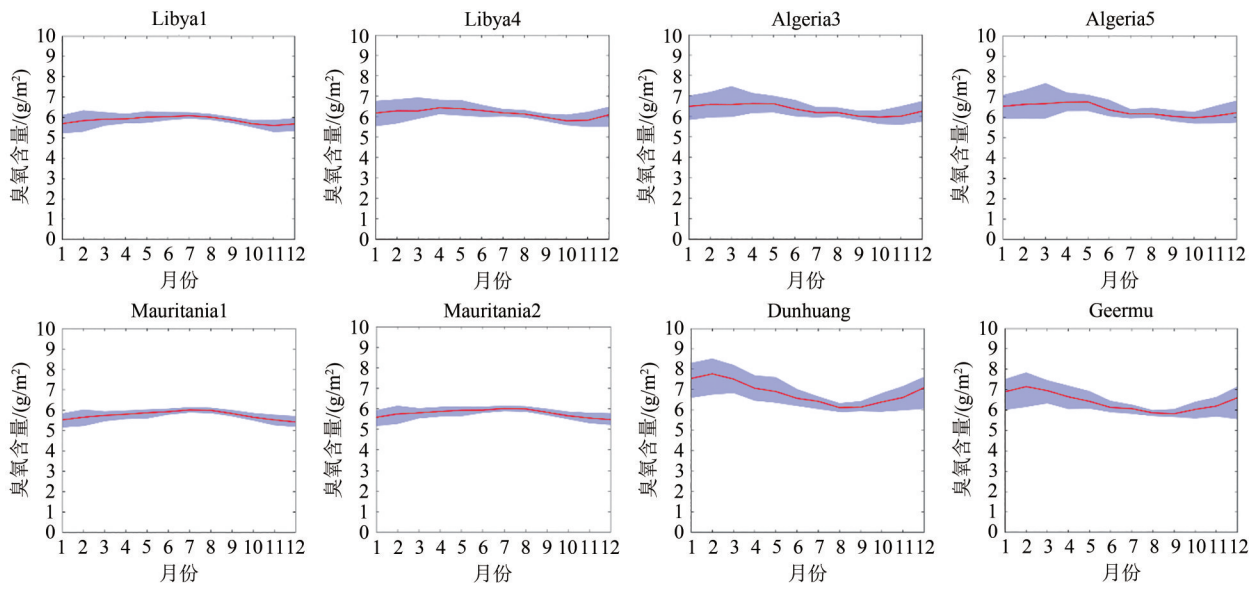
(a) 云量覆盖
(a) Cloud cover



(b) 水汽含量
(b) Water vapour content



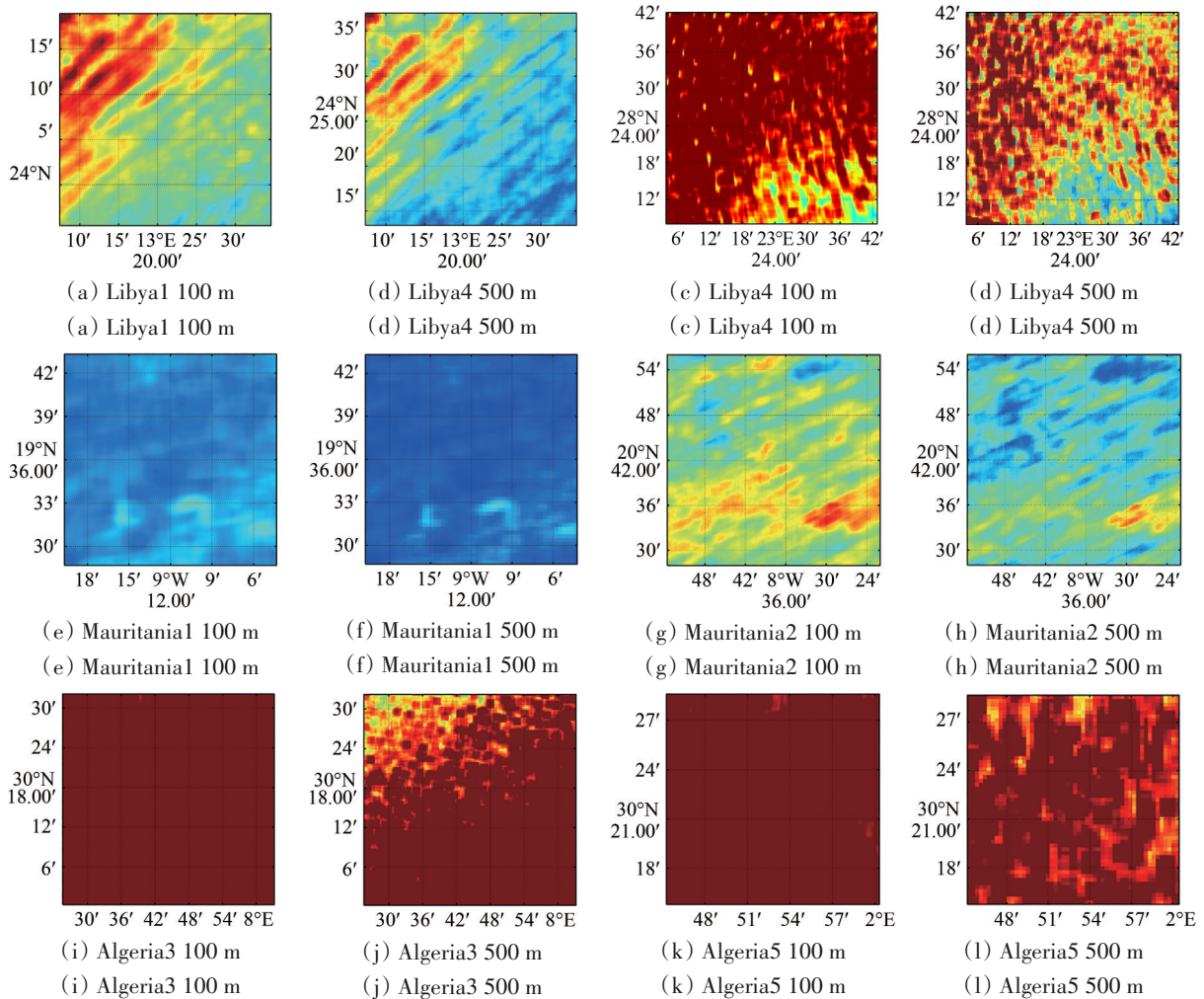
(C) 气溶胶光学厚度
(C) Aerosol optical depth



(d) 臭氧含量
(d) Ozone content

图 7 8 个稳定目标 2018 年—2020 年云量及大气参数时序图

Fig. 7 Time series diagram of cloud cover and atmospheric parameters of 8 stability targets from 2018 to 2020



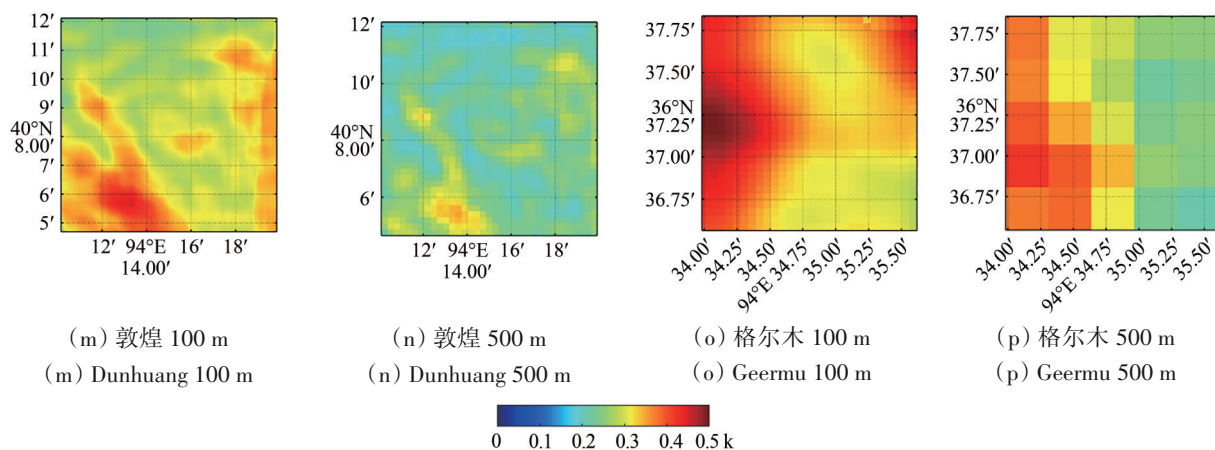
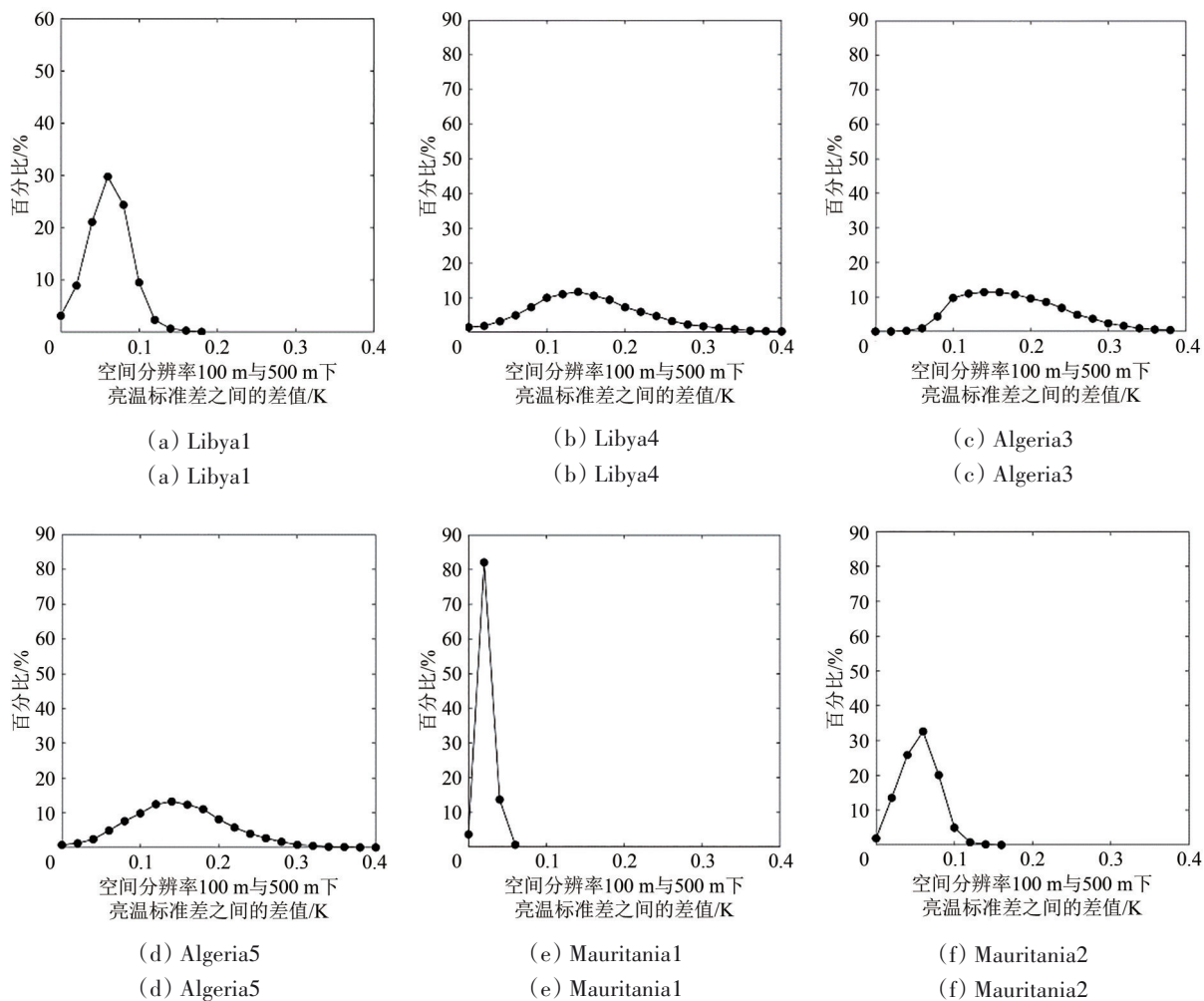


图8 基于2018年—2020年Landsat 8 TIRS数据 100 m及500 m空间尺度下空间亮温标准差均值

Fig. 8 the mean value of spatial brightness temperature standard deviation at 100m and 500m spatial resolution based on Landsat8 TIRS data from 2018 to 2020



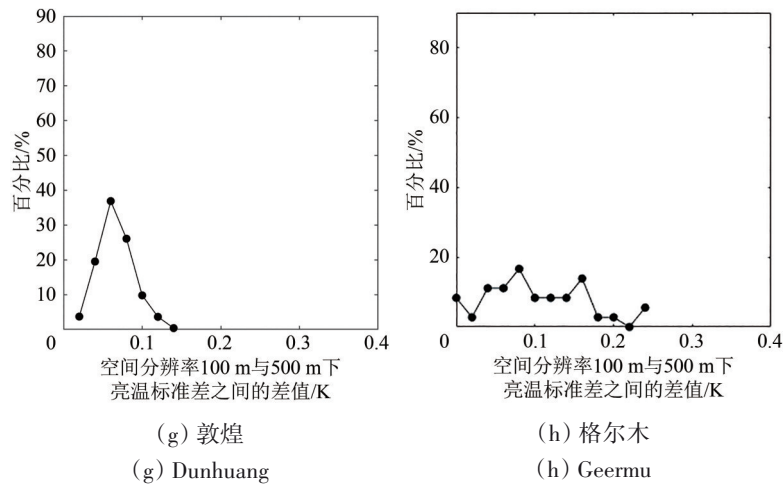


图9 Libya1_1km、Libya4_1km、Algeria3_1km、Algeria5_1km、Mauritania1_1km、Mauritania1_1km、格尔木_1km以及敦煌_1km在100 m以及500 m空间尺度下空间亮温SD差值分布统计图

Fig.9 Statistical distribution of spatial brightness temperature SD difference in Libya1_1km, Libya4_1km, Algeria3_1km, Algeria5_1km, Mauritania1_1km, Mauritania1_1km, Geermu_1km and Dunhuang at 100 m and 500 m spatial resolution

表3 在观测尺度100 m及500 m下满足甄选标准的目标区域
Table 3 The target area meeting the criterion at the spatial resolution of 100 m and 500 m

场地名称	经度/(°)	纬度/(°)	面积大小/(km ²)
Libya1_100 m_1	13.47	24.00	25×25
Libya1_100 m_2	13.51	24.20	12×12
Mauritania1_100 m	-9.20	19.60	50×50
Mauritania2_100 m	-8.75	20.46	6×6
Mauritania2_100 m	-8.82	20.83	14×14
场地名称	经度/(°)	纬度/(°)	面积大小/(km ²)
Mauritania2_100 m	-8.43	20.88	15×15
敦煌_100 m	94.24	40.20	5×5
Libya1_500 m_1	13.40	24.02	30×30
Libya1_500 m_2	13.43	24.20	15×15
Libya4_500 m_1	23.65	28.25	5×5
Libya4_500 m_1	23.63	28.80	6×6
Mauritania1_500 m	-9.20	19.60	50×50
Mauritania2_500 m	20.15	-8.70	40×40
敦煌_500 m	94.25	40.18	10×10

5 结论

本文使用3年时间跨度的MODIS MYD02_1KM TOA 辐亮度、MODIS MYD21 发射率及 Landsat 8 TIRS TOA 辐亮度数据，基于本文提出的多级空间分辨率地表热射特性评价方法，对CEOS/PICS、敦煌定标场及格尔木大灶火区域进行地表均一性及时间稳定性分析，并分别在1 km、500 m及100 m的空间尺度下，甄选出具备高空间均一且时间稳定的区域；同时对1 km空间尺度下初步甄选出的

目标区间进行尺度特性及大气特性的分析，为高频次、高精度的热红外载荷定标和真实性检验提供支持。研究结果表明：

(1) 对于1 km的空间尺度，利用MODIS数据分析发现CEOS/PICS以及敦煌定标场在MODIS 29、31及32通道均具有较高的空间均一性，而格尔木大灶火整体的空间异质性较高。本文以空间亮温SD 0.3 K及时间CV 2%作为阈值，甄选出8个均匀区域，分别为Libya1_1 km (50 km×50 km)、Libya4_1 km (75 km×75 km)、Algeria3_1 km (70 km×70 km)、Algeria5_1 km (30 km×30 km)、Mauritania1_1 km (30 km×30 km)、Mauritania2_1 km (50 km×50 km)、敦煌_1 km (15 km×15 km)及格尔木_1 km (3 km×3 km)；

(2) 对于100 m的空间尺度，在Libya1_1 km、Mauritania1_1 km、Mauritania2_1 km以及敦煌_1 km研究区域的基础上，以空间亮温SD 0.3 K为阈值，利用Landsat 8/TIRS数据甄选出7个均匀区域，分别为Libya1_100 m_1 (25 km×25 km)、Libya1_100 m_1 (12 km×12 km)、Mauritania1_100 m (30 km×30 km)、Mauritania2_100 m_1 (6 km×6 km)、Mauritania2_100 m_2 (14 km×14 km)、Mauritania2_100 m_3 (15 km×15 km)、敦煌_100 m (5 km×5 km)；Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km与格尔木_1 km研究区域整体空间异质性较高，均不满足甄选阈值；

(3) Libya4_1 km、Algeria3_1 km、Algeria5_1 km

1 km与格尔木_1 km的空间均一性受空间尺度影响较大, 相比于空间尺度500 m的亮温SD, 空间尺度为100 m的亮温SD平均升高0.163 K、0.237 K、0.158 K与0.11 K; 相比之下, Libya1_1 km、Mauritania_1 km、Mauritania2_1 km以及敦煌_1 km目标区域的空间均一性受空间尺度影响较小, 相比于空间尺度500 m的亮温SD, 100 m的亮温SD平均升高0.076 K、0.034 K、0.065 K以及0.050 K, 这说明其在1 km、500 m、100 m空间尺度下均具备较高的空间均一性, 适用于多种空间分辨率热红外载荷定标与真实性检验;

(4) Libya1及Libya4的云覆盖量较低, 其云覆盖量均值在夏季接近于0; 8个研究区域的TCWV及AOD呈现出了较为明显的季节性效应, TCWV在7或8月达到最大值, AOD则在夏季达到最大值; 格尔木大灶火的TCWV及AOD含量最低, 其TCWV月均值均小于 0.25 g/cm^2 , AOD月均值均小0.25。

参考文献(References)

- Bacour C, Briottet X, Bréon F M, Viallefont-Robinet F and Bouvet M. 2019. Revisiting pseudo invariant calibration sites (PICS) over sand deserts for vicarious calibration of optical imagers at 20 km and 100 km scales. *Remote Sensing*, 11(10): 1166 [DOI: 10.3390/rs11101166]
- Bannari A A, Omari K, Teillet P M and Fedosejevs G. 2004. 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//Proceedings of SPIE 5234, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII. Barcelona: SPIE: 590-604 [DOI: 10.1117/12.506864]
- Barsi J A, Alhammoud B, Czaplá-Myers J, Gascon F, Haque M O, Kaewmanee M, Leigh L and Markham B L. 2018. Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI radiometric cross comparison over desert sites. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 822-837 [DOI: 10.1080/22797254.2018.1507613]
- Choi T J, Xiong X X, Angal A, Chander G and Qu J J. 2014. Assessment of the spectral stability of Libya 4, Libya 1, and Mauritania 2 sites using earth observing one Hyperion. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083618 [DOI: 10.1117/1.JRS.8.083618]
- Cosnefroy H, Leroy M and Briottet X. 1996. Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 58(1): 101-114 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00211-1]
- Fu Q Y, Min X J, Li X C, Sha C M, Li X Y, Ma G Q, Pan Z Q, Guo Y, Li Q M and Liu G D. 2006. In-flight absolute calibration of the CBERS-02 CCD sensor at the Dunhuang test site. *Journal of Remote Sensing*, 10(4): 433-439 (傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 沙崇漠, 李小英, 马国强, 潘志强, 郭毅, 李启明, 刘国栋. 2006. 敦煌场地CBERS-02 CCD传感器在轨绝对辐射定标研究. 遥感学报, 10(4): 433-439)
- Gao C X, Jiang X G, Ma L L and Huo H Y. 2013. Review of radiometric cross-calibration. *Arid Land Geography*, 36(1): 139-146 (高彩霞, 姜小光, 马灵玲, 霍红元. 2013. 传感器交叉辐射定标综述. 干旱区地理, 36(1): 139-146) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.01.004]
- García-Santos V, Coll C, Valor E, Niclòs R and Caselles V. 2015. Analyzing the anisotropy of thermal infrared emissivity over arid regions using a new MODIS land surface temperature and emissivity product (MOD21). *Remote Sensing of Environment*, 169: 212-221 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.031]
- Goldberg M, Ohring G, Butler J, Cao C, Datla R, Doelling D, Gärtner V, Hewison T, Iacovazzi B, Kim D, Kurino T, Lafeuille J, Minnis P, Renaut D, Schmetz J, Tobin D, Wang L, Weng F, Wu X, Yu F, Zhang P and Zhu T. 2011. The global space-based inter-calibration system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4): 467-475 [DOI: 10.1175/2010BAMS2967.1]
- Gu X F, Guyot G and Verbrugge M. 1990. Analyse de la variabilité spatiale d'un site test. Exemple de la Crau (France). *Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing*, 1(5): 39-52
- Gyanesh C, Xiao X X, Choi T and Angal A. 2010. Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 925-939 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.003]
- He J T and Lu Y H. 1997. The measurement and evaluation of bidirectional reflectance characteristics of Dunhuang radiative calibration site. *Journal of Remote Sensing*, 1(4): 246-251 (何积泰, 陆亦怀. 1997. 敦煌辐射校正场方向反射特性测量与评价. 遥感学报, 1(4): 246-251)
- He L L. 2020. Selection, evaluation and radiometric calibration application of pseudo-invariant calibration sites (PICS) in Northwest China. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (何灵莉. 2020. 中国西北准不变定标场(PICS)的选取评价和辐射定标应用. 北京: 中国气象科学研究院) [DOI: 10.27631/d.cnki.gzqky.2020.000014]
- Hu T, Renzullo L J, Cao B, van Dijk A I J M, Du Y M, Li H, Cheng J, Xu Z H, Zhou J and Liu Q H. 2019. Directional variation in surface emissivity inferred from the MYD21 product and its influence on estimated surface upwelling longwave radiation. *Remote Sensing of Environment*, 228: 45-60 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.012]
- Hulley G C, Hughes C G and Hook S J. 2012. Quantifying uncertainties in land surface temperature and emissivity retrievals from ASTER and MODIS thermal infrared data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D23): D23113 [DOI: 10.1029/2012jd018506]
- Li C, Xue Y, Liu Q H, Guang J, He X W, Zhang J H, Wang T K and Liu X J. 2014. Post calibration of channels 1 and 2 of long-term AVHRR data record based on SeaWiFS data and pseudo-invariant targets. *Remote Sensing of Environment*, 150: 104-119 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.020]

- Li Y, Zhang Y, Liu J J, Rong Z G, Zhang L J and Zhang Y X. 2009. Calibration of the visible and near-infrared channels of the FY-2C/FY-2D GEO meteorological satellite at radiometric site. *Acta Optica Sinica*, 29(1): 41-46 (李元, 张勇, 刘京晶, 戎志国, 张立军, 张玉香. 2009. 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. *光学学报*, 29(1): 41-46) [DOI: 10.3788/AOS20092901.0041]
- Neigh C S R, McCorkel J, Campbell P K E, Ong L, Ly V, Landis D and Middleton E M. 2016. Monitoring orbital precession of EO-1 Hyperion with three atmospheric correction models in the Libya-4 PICS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(12): 1797-1801 [DOI: 10.1109/LGRS.2016.2612539]
- Odongo V, Hamm N and Milton E. 2014. Spatio-temporal assessment of Tuz Gölü, turkey as a potential radiometric vicarious calibration site. *Remote Sensing*, 6(3): 2494-2513 [DOI: 10.3390/rs6032494]
- Wei H L and Dai C M. 2014. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters. *Infrared and Laser Engineering*, 43(3): 884-890 (魏合理, 戴聪明. 2014. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析. *红外与激光工程*, 43(3): 884-890) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2276.2014.03.039]
- Wu A S, Angal A, Xiong J and Cao C Y. 2010. Using CEOS reference standard test sites to track the calibration stability of NOAA-19 AVHRR reflective solar channels//Proceedings of SPIE 7826, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIV. Toulouse: SPIE, 7826: 782621 [DOI: 10.1117/12.864601]
- Zhang Y, Rong Z G and Min M. 2016. Accuracy evaluations of the CRCS in-orbit field radiometric calibration methods for thermal infrared channels. *Advances in Earth Science*, 31(2): 171-179 (张勇, 戎志国, 闵敏. 2016. 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. *地球科学进展*, 31(2): 171-179) [DOI: 10.11867/j.issn:1001-8166.2016.02.0171]
- Zheng X B. 2014. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 9(1): 2-8 (郑小兵. 2014. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考. *大气与环境光学学报*, 9(1): 2-8)

Analysis of the thermal infrared radiation characteristics of a typical land surface stable target and applicability assessments

YANG Zhiwei^{1,2}, GAO Caixia¹, QIU Shi¹, MA Lingling¹, QIAN Yonggang¹, ZHAO Yongguang¹

1. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology,

Chinese Academy of Sciences, Aerospace Information Research Institute, Beijing 100094, China;

2. College of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Networked calibration technology using the Earth surface with suitable characteristics as a reference has become a hot topic in the international calibration field. This technology can reduce the uncertainty of independent measurement by means of multiple observations, so calibration frequency and accuracy can be effectively improved. In this study, long-time series of Aqua/MODIS and Landsat8/TIRS thermal infrared data are used to systematically analyze the surface thermal radiation and atmospheric characteristics of eight targets, namely, six pseudo-invariant calibration sites recommended by the Committee on Earth Observation Satellites and the Working Group on Calibration & Validation, the Dunhuang site, and the Geermu Dazaohuo area. Meanwhile, a criterion for selecting land surface stable targets is proposed. Specifically, the criterion states that the spatial standard deviation of brightness temperature should be less than 0.3 K, and the emissivity temporal variation coefficient should be less than 2% so that land surface stable targets suitable for the networked calibration of thermal infrared payloads can be selected for improving the in-orbit calibration accuracy of thermal infrared payloads.

To analyze the applicability of each target area at different spatial resolutions, spatial uniformity and temporal stability are evaluated at 1 km spatial resolution by using MODIS/MYD02_1KM and MODIS/MYD21 thermal infrared data, and the uniform and stable area is obtained. On this basis, spatial uniformity is evaluated at 100 and 500 m spatial resolutions by using Landsat8 thermal infrared data. Then, the uniform and stable regions are obtained at 100 and 500 m spatial resolutions. In addition, to analyze the scale characteristics, this study compares two brightness temperature SDs at 500 m spatial resolution with different features; one is the original 500 m, and the other one is downscaled from 100 m.

Results show that the areas that meet the selection criteria at 1 km spatial resolution are Libya1_1 km, Libya4_1 km, Algeria3_1 km, Algeria5_1 km, Mauritania1_1 km, Mauritania2_1 km, Dunhuang_1 km, and Geermu_1 km. Among them, Libya4_1 km has the largest area of 75 km×75 km, and Geermu_1 km has the smallest area of 3 km×3 km. At 100 m spatial resolution, seven regions are selected further from Libya_1 km, Mauritania1_1 km, Mauritania2_1 km, and Dunhuang_1 km. In these regions, the maximum area is 30 km×30 km, and the minimum area is 5 km×5 km. In addition, the spatial uniformity of Libya1_1 km, Mauritania1_1 km, Mauritania2_1 km, and Dunhuang_1 km is not sensitive to the spatial scale, indicating that these areas are suitable for the in-orbit calibration of thermal infrared payloads at various spatial resolutions.

Key words: thermal infrared, spatial heterogeneity, time stability, MODIS, Landsat 8, ECMWF

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 2018YFB0504800, 2018YFB0504804)