

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0293

王玮, 王丽娟, 孙伍红, 戴昂, 胡蝶, 郭妮. 祁连山草地 MODIS LST 产品真实性检验. 草业科学, 2020, 37(12): 2444-2456.
WANG W, WANG L J, SUN W H, DAI A, HU D, GUO N. Validation of MODIS land surface temperature products in grasslands of Qilian Mountain. Pratacultural Science, 2020, 37(12): 2444-2456.

祁连山草地 MODIS LST 产品真实性检验

王玮¹, 王丽娟¹, 孙伍红², 戴昂³, 胡蝶¹, 郭妮¹

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 / 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室 / 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃兰州 730020; 2. 肃南裕固族自治县气象局, 甘肃张掖 734400; 3. 玛曲县气象局, 甘南玛曲 747300)

摘要: 利用祁连山自动站实测地表温度数据, 对中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 地表温度 (land surface temperature, LST) 日产品 (MOD/MYD11A1) 进行真实性检验和对比分析, 评价不同下垫面上 MODIS LST 标准产品的空间适应性, 订正由地表类型变化而引起 MODIS LST 产品的误差。结果表明, 在祁连山西段海拔相对较低的荒漠草地上, MOD11A1 LST 产品与实测地表温度数据具有较高的空间一致性, 平均误差和均方根误差较低, 分别为 1.62 和 3.88 °C; 在祁连山海拔相对较高的东段山地草甸和中段高寒草地上, MYD11A1 LST 产品精度较高, 平均误差为 2.02 和 3.72 °C, 均方根误差为 5.12 和 6.92 °C。在祁连山地区, MODIS LST 产品精度不仅受地表类型的影响, 同时还受植被覆盖度和海拔高度的影响。在海拔相对较高的祁连山东段山地草甸和中段高寒草地区, 由于地表升温速度慢, 植被盖度较高, MOD11A1 LST 产品的精度较低, 且高估了该地区的实际地表温度, 均方根误差在 5.12 °C 以上。通过误差订正可有效提高 MODIS LST 产品在祁连山山地草甸、高寒草地和荒漠草地上的精度, 均方根误差分别降低了 1.29、2.66 和 0.91 °C。

关键词: 祁连山; MODIS; 地表温度; 精度评价; 适应性分析

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)12-2444-13

Validation of MODIS land surface temperature products in grasslands of Qilian Mountain

WANG Wei¹, WANG Lijuan¹, SUN Wuhong², DAI Ang³, HU Die¹, GUO Ni¹

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province / Key Open Laboratory of Arid Change and Disaster Reduction of CMA / Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Weather Bureau of Sunan Yugu Autonomous County, Zhangye 734400, Gansu, China; 3. Weather Bureau of Maqu County, Gannan 747300, Gansu, China)

Abstract: Land surface temperature (LST) values measured at automatic weather stations in Qilian Mountain in China, were adopted to perform validation tests and comparative analysis of daily moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) LST products (MOD/MYD11A1). The aim of the study was to assess the space adaptability of standard MODIS LST products on different underlying surfaces and to correct the error detected in these products due to changes in land surface types. The results indicated that in desert grasslands with low altitudes in the western section of Qilian Mountain, MOD11A1 LST products showed higher space consistency and adaptability, with respect to the measured LST. The average error and root mean square error (RMSE) were 1.62 °C and 3.88 °C, respectively. On the mountain grassland in the eastern section and alpine grassland in the middle section of Qilian Mountain, which had higher altitudes, MYD11A1 LST products

收稿日期: 2020-06-02 接受日期: 2020-07-21

基金项目: 甘肃省气象局气象科研项目 (ZcMs2020-22); 国家自然科学基金项目 (41805086、41801191、31672484、31702175)

第一作者: 王玮 (1985-), 男, 甘肃兰州人, 副研究员, 博士, 主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: wangw@iamcma.cn

通信作者: 王丽娟 (1986-), 女, 四川广安人, 副研究员, 博士, 主要从事卫星遥感应用研究。E-mail: wanglj@iamcma.cn

showed higher accuracy; average errors were 2.02 °C and 3.72 °C, respectively, while the RMSEs were 5.12 °C and 6.92 °C, respectively. In addition to the effect of land surface types, the accuracy of MODIS LST products is also influenced by vegetation cover and altitude, as seen in the Qilian Mountain. On the mountain grassland in the eastern section and alpine grassland in the middle section of Qilian Mountain, which have higher altitudes, MOD11A1 LST products showed less accuracy due to the slow rate of temperature rise and high vegetation coverage, which resulted in an overestimation of the actual LST in these areas, with an error of over 5.12 °C. With the help of error correction, the accuracies of MODIS LST products when used on mountain, alpine, and desert grasslands of the Qilian Mountain were effectively improved, as the RMSEs of the products were reduced by 1.29, 2.66, and 0.91 °C, respectively.

Keywords: Qilian Mountain; MODIS; land surface temperature; accuracy assessment; adaptive analysis

Corresponding author: WANG Lijuan E-mail: wanglj@iamcma.cn

地表温度 (land surface temperature, LST) 是表征地表过程变化的重要物理量, 能够反映地表能量平衡状态的时空变化信息, 它综合了物质地表与大气相互作用以及大气和陆地之间能量交换的结果, 是区域和全球尺度上陆地表层系统过程的关键参数, 已在全球气候变化模拟、生态环境评价、干旱监测以及粮食估产等方面广泛应用^[1]。准确获取 LST 数据对优化热惯量、地表蒸散和土壤湿度模型, 以及评估草地生产力和鉴定天然牧草品质方面都具有重要的意义。

传统地面测量地表温度的结果准确, 但难以满足大尺度和时空连续测量的需求。随着卫星遥感技术的迅速发展, 为大尺度、高时空分辨率的 LST 反演提供了新途径^[2]。目前基于甚高分辨率辐射计 (advanced very high resolution radiometer, AVHRR)、中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、先进星载热辐射与反射辐射计 (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, ASTER) 等传感器数据, 结合多种反演算法及模型, 生成了多套全球 LST 时间序列产品, 并在科学研究和生产实践中得到广泛应用^[3]。虽然, LST 数据集在发布前都经过了系统性的算法处理以及较为严格的数据质量控制, 但受地表特征变化、大气条件以及传感器自身等因素的影响, 使得这些数据集的可靠性和连续性受到了极大挑战^[4-7]。因此, 在应用这些数据前, 开展 LST 产品真实性检验与精度评价方面的工作是十分必要的。

目前国内外对遥感反演 LST 产品进行真实性检验的方法主要有直接利用地表温度实测数据验证、基于辐射传输模型验证以及利用高质量和高分

辨率遥感数据交叉验证中低分辨率 LST 产品等^[8]。其中直接利用站点实测数据验证的方法被广泛应用于检验大面积的平坦区域。该方法的优点是可以直接评价卫星数据的质量和检验 LST 产品的反演算法, 但缺点是需要在地面布设大量的观测站点, 投入成本较高, 且精度评价结果依赖于地表站点观测精度和卫星像元尺度的代表性。基于辐射传输模型验证的优势是不依赖于地表同步测量的 LST 数据, 但该方法严重依赖于大气辐射传输模型的精度, 适合无法准确获取地表温度观测的区域验证。交叉验证方法是将已知精度的 LST 产品作为参考, 进行比较和验证未知精度的 LST 反演结果。由于 LST 具有较强的时空异质性, 因此该方法更适合具有相同或者相似观测时间和角度数据之间的验证^[9]。

Wan 等^[10]利用野外地面实测数据验证 MODIS LST 产品精度的研究表明, 在湖泊、草地、沙漠等平坦均质的下垫面上, MODIS LST 产品具有较高精度, 尤其是在晴空天气下, 均方根误差小于 1 °C。Caselles 等^[11]利用均一农田站点观测数据对 MODIS LST 产品进行真实性检验, 结果表明 MODIS LST 产品在反演 25~32 °C 区间的地表温度时具有较高的精度, 均方根误差在 0.5~0.9 °C。Wang 等^[12]研究全天候的地表温度动态变化特征后指出, 白天的 LST 有较强空间异质性, MODIS LST 夜间产品具有更好的空间一致性和较高的精度。Sabol 等^[13]利用北美最大高山湖泊多点实测水面温度验证 ASTER LST 产品精度发现, 云、气溶胶以及晴空条件下大气温度和水汽廓线等环境因素对 LST 反演精度影响较大, 均方根误差最高可达 15 °C。Wan 和 Li^[14]以及 Wan^[15]基于辐射传输模型, 将水汽廓线等大气环境数据作

为模型输入参数,模拟卫星过境时的天顶辐射值,并与同期卫星观测的辐射值进行对比分析,从而改进了遥感反演 LST 产品的精度。Qian 等^[16]尝试利用交叉验证的方法评价欧洲气象卫星 (METEOSAT second generation-1, MSG) 旋转增强可见红外成像仪 (spinning enhanced visible and infrared imager, SEVIRI) 和 MODIS LST 产品的精度,结果表明, LST 具有较强的时空异质性,地表类型、不同卫星过境时间以及传感器角度等因素对交叉验证结果影响较大。王之夏等^[17]发现, MODIS LST 产品与常规气象站地面观测的地表 0 cm 温度数据在时空序列上的变化趋势一致,但平均误差较大,误差很大程度上受二者观测方法差异的影响。邹德富等^[18]验证青藏高原连续多年冻土区 MODIS LST 产品和美国陆地卫星 (Landsat) 增强型专题成像仪 (enhanced thematic mapper, ETM+) 反演 LST 数据的精度表明,白天受冻土层特性和太阳辐射的影响,遥感反演 LST 产品的误差较大,相比较而言, MODIS LST 夜间产品具有更高的精度,均方根误差小于 1.78 °C。石亚亚等^[19]利用 MODIS LST 产品提取青藏高原冻土分布图时发现,受植被、积雪以及高寒低温天气等因素影响, MODIS LST 产品在季节冻土和多年冻土区分别存在低估和高估的现象,其产品适应性仍然需要根据下垫面特性进行检验和改进。为此,众多学者根据研究区和对象特性建立了多种基于单通道、多通道劈窗和多角度的热红外波段反演 LST 的方法和时序重建算法,并对生成的相应 LST 产品进行真实性检验与精度评价^[20-21]。这些工作为改进和提高 LST 产品的精度,以及推动热红外遥感反演地表温度的研究与发展奠定了坚实基础。

然而,由于陆地表面的复杂性,其组成和结构等均存在差异,导致陆地表面温度遥感反演仍然具有较多的不确定性。目前,对 LST 产品进行真实性检验的工作主要集中在单一下垫面上,在不同下垫面上对同一遥感反演 LST 产品进行适应性分析和精度评价的工作仍然需要进一步完善。虽然 MODIS LST 标准产品已结合云掩膜产品和辐射传输模型进行了质量控制,但为了简化遥感反演过程,部分地区采用了平均状况下的环境参数设置,这与我国祁连山区的气候、地形、植被覆盖、纬度等诸多方面还

存在着较大差异^[22],尤其是对生态环境监测更有意义的 MODIS LST 白天产品,其质量仍然需要进一步检验。同时由于缺少相应的地表温度实测验证数据,导致 LST 产品在一些区域的精度和适用性暂无定论,极大限制了祁连山自然保护区生态环境遥感监测研究与应用相关工作的开展。

祁连山自然保护区是我国西部重要的生态安全屏障,其水源涵养功能区不仅具有拦蓄降水、缩小温差、保持土壤湿度等作用,而且在消洪补枯、涵养水源、水土保持等方面作用显著^[23]。草地资源是该地区生态系统的重要组成部分,但自 20 世纪 80 年代以来,由于全球气候变化的影响和人为造成的生态破坏,导致祁连山生态保护区面临着草原退化严重、生态环境恶化、冰川萎缩等严峻的生态环境问题。目前,亟需利用高质量、长时序卫星遥感资料开展祁连山草地生态环境监测和治理评估方面的工作,为近年来国家实施的增强生态环境保护、推进水资源集约利用和推动生态功能区高质量发展等一系列政策措施提供决策支持。

因此,本研究利用祁连山区自动站实测地表温度数据,对 MODIS LST 日产品 (MOD/MYD11A1) 进行精度验证和对比分析,评价不同下垫面上 MODIS LST 标准产品的适用性,尝试订正由地表类型变化而引起的遥感反演地表温度产品的误差,为时间序列卫星遥感产品有效地应用于祁连山自然保护区生态环境监测研究提供科学参考。

1 研究区概况

祁连山位于青藏高原东北缘,在青海省和甘肃省交界处,祁连山不仅是我国西北干旱区的水源涵养功能区和国家重点生态功能区,同时也是我国西部重要的生物多样性保护区域,其主要保护对象有高山生态系统、水源涵养林、草原植被及野生动物。该地区属于典型高原大陆性气候,海拔高度 1 674~5 584 m,年平均气温较低,常年处于 0 °C 以下,年降水量 250~700 mm,且降水主要集中在 5 月-9 月^[24-25]。研究区内地形起伏较大,主要山脉均为西北-东南走向,其间分布山间谷地。受地形影响,祁连山东、中、西段降水和气温的垂直变化显著,且复杂的地貌和气候变化使得区内植被类型多样。根据刘钟龄^[26]中国草地资源图,该地区主要植被类型有高寒草

地、山地草甸、荒漠草地、灌丛草地、林地等 (图 1)。该地区特殊的地理位置以及气候地形条件, 孕育了

丰富的积雪和冰川资源, 不仅是河西地区经济建设的基础, 也是人民赖以生存的命脉。

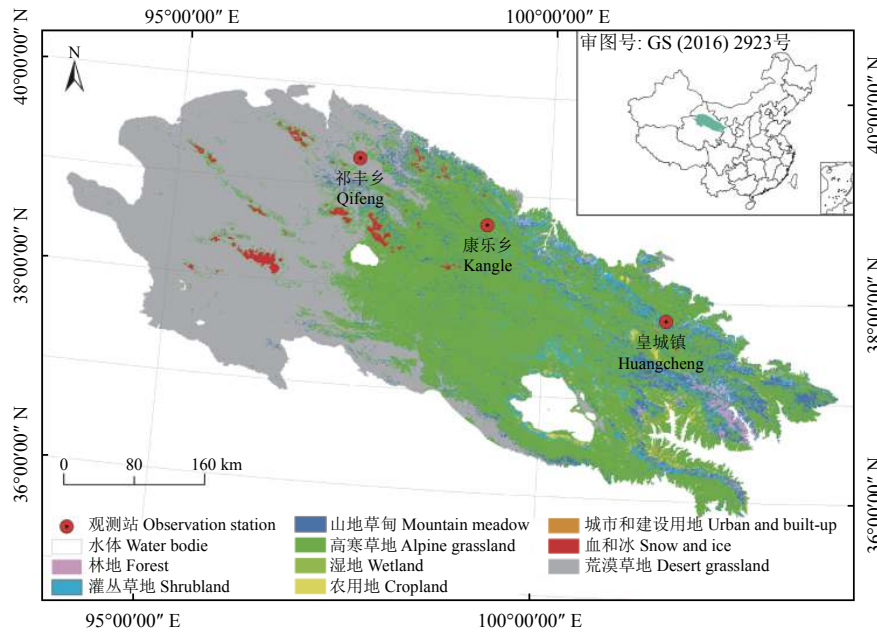


图 1 祁连山植被类型和生态定位站位置图

Figure 1 Vegetation types and ecological positioning stations location in the Qilian Mountains

2 数据与方法

2.1 地表温度自动站建设与实测数据获取

为准确估计 MODIS LST 产品的精度, 尽可能降低由空间异质性引起的尺度效应, 通过前期调研, 在祁连山东、中、西各段分别选取植被空间分布较为均匀、代表性强、地势相对平坦, 且面积大于 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的下垫面作为建站观测样区。其中在祁连山东段选取张掖市肃南县皇城镇 (Huangcheng, HC) 附近山地草甸下垫面 ($101^{\circ}48'36.00'' \text{ E}$; $37^{\circ}54'44.00'' \text{ N}$; 海拔 2920 m)、中段选取张掖市肃南县康乐乡 (Kangle, KL) 附近的高寒草地下垫面 ($99^{\circ}49'20.00'' \text{ E}$; $38^{\circ}46'16.00'' \text{ N}$; 海拔 3730 m)、西段选取张掖市肃南县祁丰乡 (Qifeng, QF) 附近的荒漠草地下垫面 ($98^{\circ}8'6.35'' \text{ E}$; $39^{\circ}40'44.39'' \text{ N}$; 海拔 1900 m) 为代表 (图 1)。3 个自动站自 2019 年 6 月 1 日开工建设, 于 2019 年 6 月 6 日全部安装完毕, 并于同日开始运行, 目前设备运行正常, 数据接收正常。

为避免由于观测方法差异引起的误差, 尽可能得保持与卫星遥感观测原理相一致, 自动站由美国 CSI 公司生产的高分辨通用采集器 CR1000、美国

APOGEE 公司生产的 SI-411 表面温度传感器以及英国 SKYE 公司的 SKR 1800 红光-近红外双通道光量子传感器等仪器设备组成 (图 2)。在设备安装时, 保持 SI-411 表面温度传感器与待测地面样方垂直, 安装在距离地面 1.5 m 高度的支架上, 并设置观测数据时间分辨率为 0.25 h (表 1)。每个站点均配置通用无线分组业务 (general packet radio service, GPRS) 远传数据传输模块, 可实现无人值守、传感器故障远程自动报警和数据远程控制下载。同时, 对每日台站观测数据进行自相关分析和方差检验, 判断数据的连续性和可靠性。本研究通过选取自相关系数的绝对值大于 0, 且置信度为 95% 时通过显著性检验的数据, 作为实测数据集。

为与 MODIS/Terra (上午星) 和 MODIS/Aqua (下午星) 的过境时间相匹配, 同时考虑卫星轨道漂移以及降低观测数据噪声等情况, 从实测数据集中分别选取 3 个自动站 2019 年 6 月 6 日 - 12 月 31 日 $10:30 - 11:30$ 和 $13:30 - 14:30$ 时段的地表温度数据, 结合 MOD11A1 和 MYD11A1 卫星过境时间信息, 选取与卫星过境时差最小的地表温度观测数据作为逐日上、下午的地表温度实测数据 (图 3)。

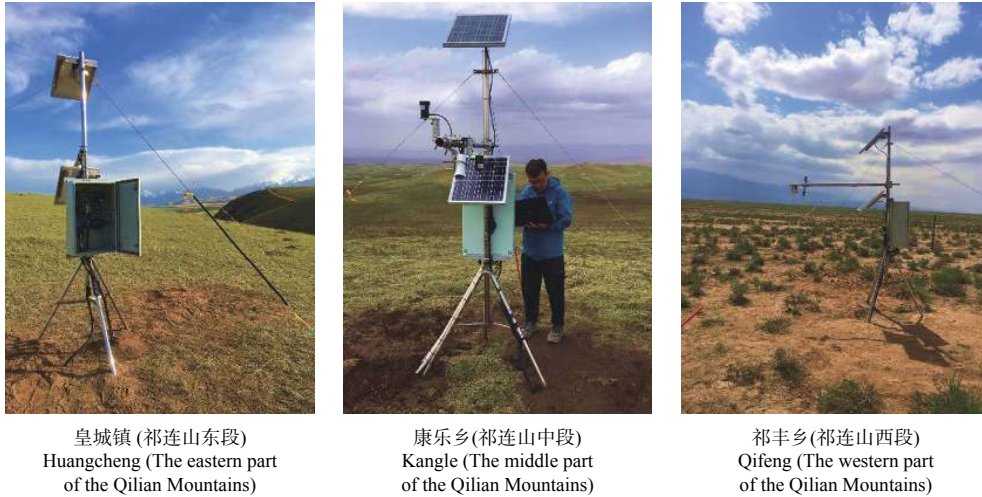


图 2 仪器组成及架设环境图

Figure 2 Instrument composition and set up environment

表 1 自动站安装介绍

Table 1 Introduction of automatic weather station installation

观测项目 Item	仪器型号 Sensor	安装高度 Sensor height/m	观测时段 Observation time/d	观测频次 Observation frequency/h
地表温度 Land surface temperature	SI-411	1.5	2019年6月至今 2019-06 to now	
归一化植被指数 Normalized differential vegetation index	SKR 1800	1.5		0.25
土壤温湿度(5层) Soil temperature and moisture (5 Layers)	Campbell 107/CS616	-0.05、-0.1、 -0.2、-0.3、-0.4	2019年7月至今 2019-07 to now	

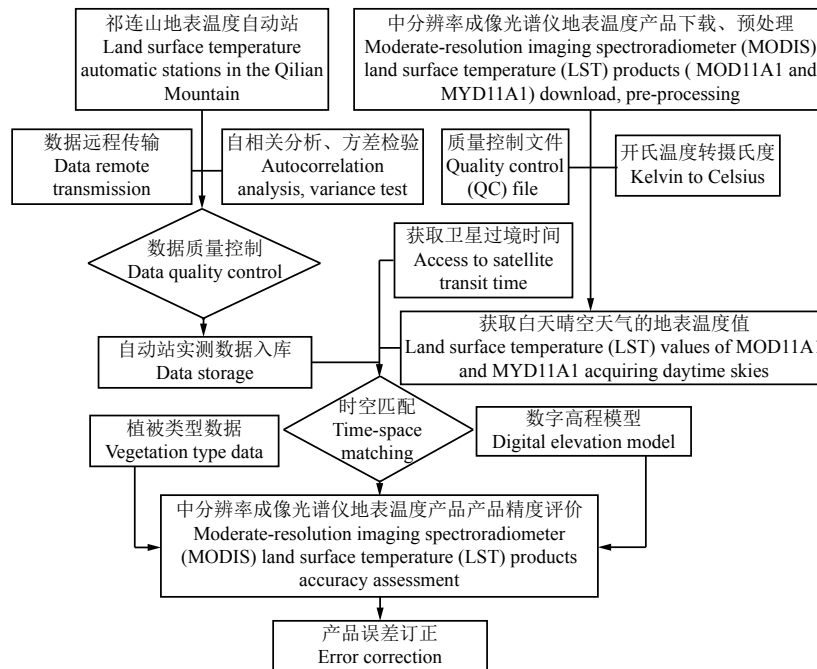


图 3 数据处理流程图

Figure 3 Flow of the data processing

2.2 MODIS LST 产品

本研究使用的 MODIS 地表温度产品包括 Terra 星 (MOD11A1) 和 Aqua 星 (MYD11A1) 2 种。该产品以 Wan 和 Dozier^[27] 提出的广义劈窗算法为基础, 详细算法可参考 Wan^[28] 编写的 MODIS 地表温度产品用户手册。通过美国宇航局地球观测系统 (Earth Observing System Data and Information System, EOSDIS) 的陆表过程分布式数据档案中心 (<https://lpdaac.usgs.gov/>) 下载了 2019 年 6 月 6 日 - 12 月 31 日 V006 版的 MOD11A1 和 MYD11A1 LST 日产品。

覆盖整个祁连山研究区需要 3 幅 MODIS 影像, 轨道号分别为 h25v04、h25v05 和 h26v05。利用 MODIS L3 级产品处理工具软件 (MODIS reprojection tools, MRT) 分别对 MOD11A1 和 MYD11A1 地表温度产品进行接边和坐标变换处理。最后将图像处理成 grid 格式, 空间分辨率为 1 km, 采用 Albers 等积圆锥投影。

分别提取 3 个站点所在地理位置上的 MODIS LST 值和相应质量控制信息, 剔除空值和异常值, 选取质量控制字段为 0 的数据, 即保证每个像元上数据质量为优的样本进行精度评价 (图 3)。最终获取 MOD11A1 和 MYD11A1 的有效样本数分别为 151 和 145 (皇城镇)、123 和 121 (康乐乡)、161 和 149 (祁丰乡), 分别占总样本数的 70.52% 和 69.04%、58.57% 和 57.61%、76.35% 和 70.79%。

2.3 精度评价方法

首先, 用 MODIS LST 采样值同自动站实测地表温度值进行对比, 分析不同下垫面上采样值与实测值之间的误差分布状况。然后, 计算采样值与实测值在不同下垫面上的平均误差 (P_a)、绝对平均误差 (P_d)、均方根误差 (root mean square error, RMSE), 用以评价不同下垫面上 MODIS 遥感反演 LST 产品的精度。

$$P_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i); \quad (1)$$

$$P_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|; \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}. \quad (3)$$

式中: x_i 和 y_i 分别表示 MODIS LST 采样值及其对应的实际观测值, n 为用于验证的样本数目。

本研究根据随机数表法, 在 2019 年 6 月 - 12 月实测数据集和 MODIS LST 采样数据集中, 随机抽取 30 对时空相一致的有效样本作为订正数据, 用于对祁连山不同下垫面上的 MODIS LST 产品进行订正和改进, 其他数据作为验证数据, 用于对 MODIS LST 产品进行精度评价。同时, 考虑白天的地表温度变化对祁连山生态环境监测与评估更有意义, 因此本研究选取白天的 MODIS LST 产品同自动站实测数据进行对比分析研究。

3 结果与分析

3.1 祁连山地表温度变化特征分析

为避免数据噪声扰动, 参考同期质量更好的 MODIS LST 8 日产品, 利用自动站 8 日平均实测数据分析地表温度 (LST) 变化特征。结果表明, 在 2019 年 6 月 - 12 月 3 个站点监测的地表温度结果差异较大, 但总体符合各下垫面类型的地表温度变化特点。其中在祁连山中段康乐乡 (KL) 的高寒草地植被区, 由于海拔高、下垫面均一, 植被覆盖度相对较高, 因此该样区的地表温度相对较低, 上、下午数值分别介于 $-14.71 \sim 21.94 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $-13.11 \sim 26.01 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。在 6 月 - 9 月间 LST 数值变化幅度小, 生态环境较为稳定, 但在 9 月以后, 随着环境温度和日照强度的逐渐降低, LST 数值也迅速降低, 变化幅度较大。在祁连山西段祁丰乡 (QF) 荒漠植被区, 海拔相对较低、植被生长状况整体较差, 植被覆盖度低, 因此该样区 LST 变化幅度大、对日照强度敏感, LST 数值相对较高, 上、下午 LST 数值分别介于 $-0.12 \sim 38.63 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $0.72 \sim 47.61 \text{ } ^\circ\text{C}$, 自然环境较为恶劣。祁连山东段皇城镇 (HC) 山地草甸植被区的 LST 变化情况介于中段和西段之间, 生态环境状况处于 2 个样区的中间水平, 但具有明显的月份差异。当在植被返青和生长前期 (7 月前) 且覆盖度较低时, LST 变化与祁连山西段荒漠植被样区相类似; 当在盛草期 (7 月 - 8 月) 时, 植被覆盖度较高, LST 变化趋于稳定, 与祁

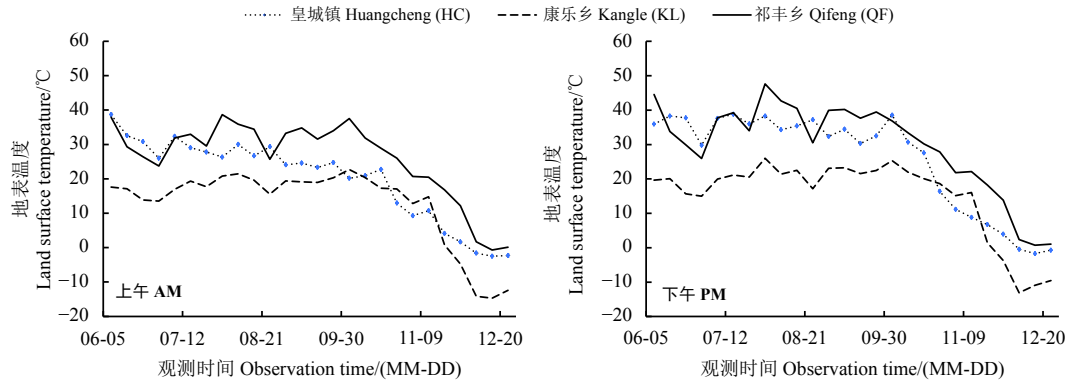


图4 2019年6月5日-12月31日自动站实测地表温度数据

Figure 4 Land surface temperature data at automatic stations between June 5 to December 31, 2019

连山中段高寒草地样区相类似;当植被开始逐渐枯黄(9月后)时,随着环境温度和日照强度的降低,LST数值也在迅速降低(图4)。

总体而言,3个自动站的LST监测结果较为稳定,下午温度平均高出上午2~5℃,且符合各下垫面上环境温度、日照强度以及植被生长特征规律,具有较好的代表性,适合开展祁连山区卫星遥感反演LST产品的校验工作。

根据MODIS LST产品质量控制文件,选取每个月同期质量最好的MOD11A1和MYD11A1 LST产品,通过空间对比分析可以看出,MODIS MOD11A1(上午)和MYD11A1(下午)产品的地表温度空间分布基本一致,但部分地区和不同月份LST数值存在空间差异。在2019年6月-12月期间,MODIS上、下午星过境整个祁连山地区的时间段在10:39-11:13和13:33-14:07,且在同一时间和区域内,MYD11A1 LST数值普遍高于MOD11A1 LST数值(图5)。

3.2 MODIS LST 产品精度分析

利用地表温度实测数据与相应时期MODIS LST产品采样值进行对比,结果表明:与MODIS/Terra(上午星)相比,祁连山东段皇城站和中段康乐站的实测值与MYD11A1 LST产品的采样值具有较高的线性相关,决定系数(R^2)分别达到0.74和0.65。在祁连山西段祁丰站的实测值与MOD11A1 LST产品具有较高的线性相关, R^2 达到0.80(图6)。

根据误差分析结果表明,在各下垫面上MODIS LST产品表现出不同的高估或低估现象。其中,在祁连山东段皇城站代表的山地草甸上,MODIS

LST产品精度受到植被生长状况和实际地表温度变化的影响。当在盛草期(7月-8月)植被覆盖度相对较高,且上午实际地表温度小于25℃时,MOD11A1 LST产品易出现低估的现象。当在植被返青(6月)和枯黄期(10月-12月),植被覆盖度相对较低,且上午实际地表温度大于35℃时,又频繁出现高估现象,其中Pa、Pd和RMSE分别为-2.77、4.07和5.52℃。与此同时,在该下垫面上,MYD11A1 LST产品与实测数据的变化趋势较为接近,误差相对较低,Pa、Pd和RMSE分别为2.02、3.73和5.12℃,但普遍存在高估的现象。在祁连山西段祁丰站的荒漠草原上,MOD11A1和MYD11A1 LST产品与实测数据均具有较高的一致性,其中MODIS/Aqua(下午星)与实测数据具有基本相同的变化趋势,能够敏感地反映出该地区地表温度的变化特征,但该产品存在高估现象,Pa、Pd和RMSE分别为1.92、3.04和4.11℃。与其相比较,MOD11A1 LST产品与实测数据更加接近,具有较高的精度,Pa、Pd和RMSE分别为1.62、2.89和3.88℃。在祁连山中段康乐站代表的高寒草原草地上,由于实际地表温度较低,MOD11A1和MYD11A1 LST产品与实测数据的平均误差较大,且均存在严重的高估现象。与MOD11A1相比较,在该下垫面上,MYD11A1具有较好的精度,Pa、Pd和RMSE分别为3.72、5.14和6.92℃(表2和图6)。

总体而言,在祁连山西段海拔较低的荒漠草原上,MODIS/Terra(上午星)LST产品与实测LST数据具有较高的一致性,且具有更好的空间适应性;在祁连山海拔相对较高的东段山地草甸和中段高寒草原草地上,MODIS/Aqua(下午星)反演的LST

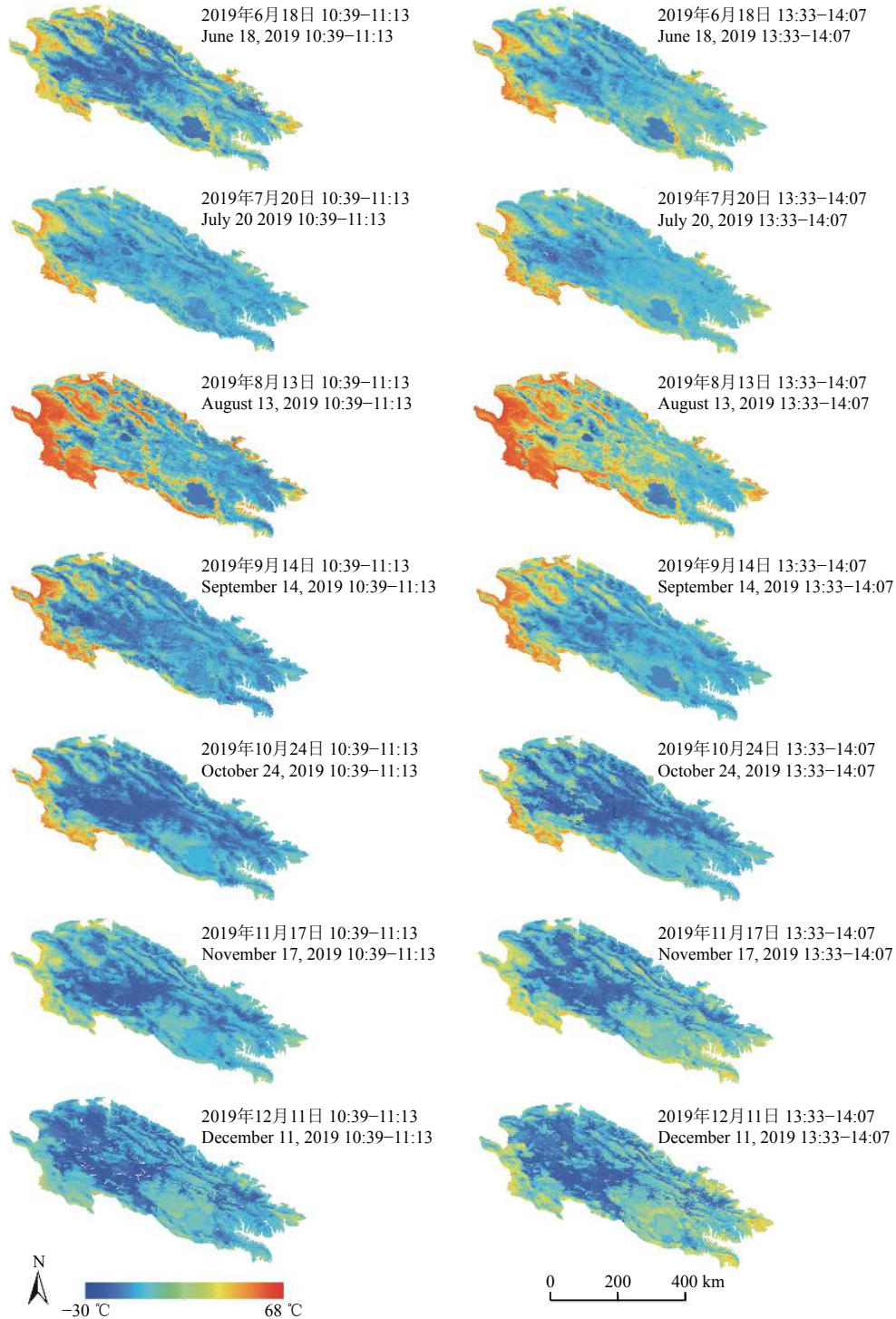


图 5 中分辨率成像光谱仪地表温度产品 MOD11A1 和 MYD11A1 空间分布图

Figure 5 Results of moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature (LST) products

结果具有更高的精度, 更加能反映该地区地表温度的变化特征。但在各下垫面上, MODIS LST 产品均存在不同程度的误差, 需要对其进行订正。

3.3 MODIS LST 产品的订正

根据以上 MODIS LST 产品适应性分析结果, 选

取 2019 年 6 月 - 12 月祁连山东段皇城镇和中段康乐乡站点实测地表温度数据与相应 MYD11A1 LST 采样值, 以及祁连山西段祁丰乡站点实测数据与同期 MOD11A1 LST 采样值, 分别建立线性统计模型 (表 3), 并将订正数据带入相应模型。通过改进 MODIS LST 产品可以看出, MODIS LST 产品在祁

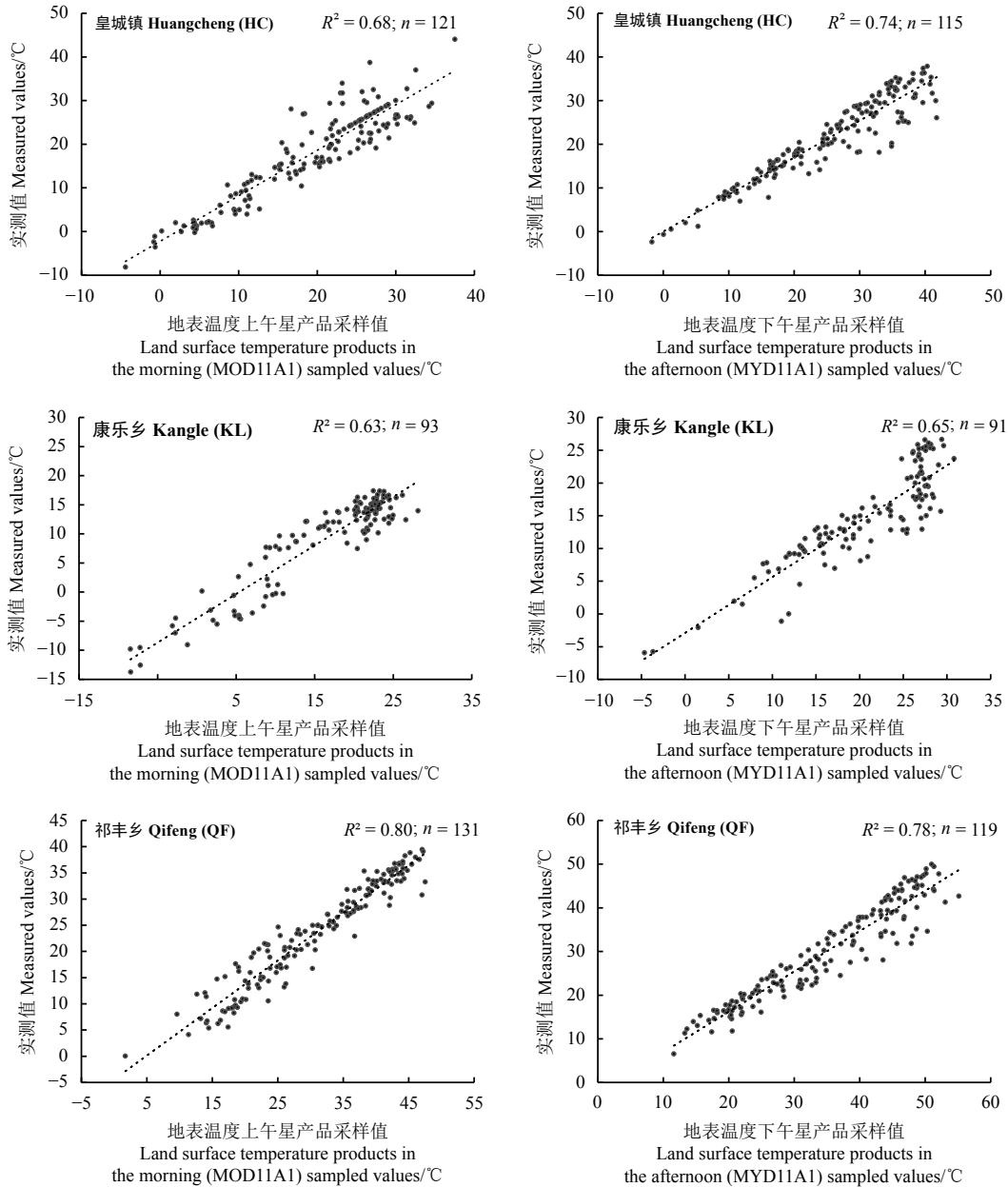


图 6 地表温度实测数据与 MODIS LST 产品采样值对比

Figure 6 Comparison between the MODIS LST sampled values and the LST observed values in automatic stations

表 2 中分辨率成像光谱仪地表温度产品精度分析
Table 2 Accuracy analysis of moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature (LST) products

站点 Station	植被类型 Vegetation type	地表温度上午星产品 Land surface temperature products in the morning (MOD11A1)/°C			地表温度下午星产品 Land Surface temperature products in the afternoon (MYD11A1)/°C		
		Pa	Pd	RMSE	Pa	Pd	RMSE
皇城镇 Huangcheng (HC)	山地草甸 Mountain meadow	-2.77	4.07	5.52	2.02	3.73	5.12
康乐乡 Kangle (KL)	高寒草地 Alpine grassland	4.03	5.91	7.16	3.72	5.14	6.92
祁丰乡 Qifeng (QF)	荒漠草地 Desert grassland	1.62	2.89	3.88	1.92	3.04	4.11

表 3 祁连山中分辨率成像光谱仪地表温度产品订正
Table 3 Revision of moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature (LST) products in Qilian Mountains

站点 Station	植被类型 Vegetation type	公式 Linear formula	R^2	适用数据 Applicable data
皇城镇 Huangcheng (HC)	山地草甸 Mountain meadow	$y = 0.65x + 0.72$	0.74	地表温度下午星产品 Land surface temperature products in the afternoon (MYD11A1)
康乐乡 Kangle (KL)	高寒草地 Alpine grassland	$y = 0.74x - 2.61$	0.65	地表温度下午星产品 Land surface temperature products in the afternoon (MYD11A1)
祁丰乡 Qifeng (QF)	荒漠草地 Desert grassland	$y = 0.82x + 0.745$	0.80	地表温度上午星产品 Land surface temperature products in the morning (MOD11A1)

连山山地草甸、高寒草地和荒漠草地上的精度均有所提高, 其中在高寒草地上改进最为明显, Pa、Pd 和 RMSE 由 3.72、5.14 和 6.92 °C 分别降低为 2.82、3.57 和 4.26 °C; 在荒漠草地上, 改进后的 MODIS LST 产品精度达到最高, 与改进前相比, Pa、Pd 和 RMSE 分别降低了 0.45、0.24 和 0.91 °C; 在山地草甸上, 改进后 MODIS LST 产品精度优于在高寒草地上, 但低于在荒漠草地上, Pa、Pd 和 RMSE 分别为 1.84、2.97 和 3.83 °C (表 4)。

表 4 订正后的中分辨率成像光谱仪地表温度产品精度
Table 4 Accuracy analysis of orrected moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature (LST) products

站点 Station	Pa	Pd	RMSE
皇城镇 Huangcheng (HC)	1.84	2.97	3.83
康乐乡 Kangle (KL)	2.82	3.57	4.26
祁丰乡 Qifeng (QF)	1.17	2.65	2.97

4 讨论

虽然 MODIS LST 产品在祁连山不同下垫面上具有较好的精度, 但仍存在高估或低估的现象, 其精度具有明显的空间差异性。其中在祁连山西段祁丰站代表的荒漠草原上, 由于海拔相对较低且植被较为稀疏, 白天地表升温速度快, 当上午实际地表温度达到 25~30 °C 时, 在晴空天气条件下 MOD11A1 LST 产品与实测数据具有较高的一致性, Pa、Pd 和 RMSE 分别为 1.62、2.89 和 3.88 °C; 当地表继续升温, 并超过 30 °C 时, MODIS LST 产品精度开始降低, MYD11A1 LST 出现明显高估的现象, Pa、Pd 和

RMSE 分别达到 1.92、3.04 和 4.11 °C, 因此在该下垫面上 MOD11A1 LST 产品具有更高的精度和空间适应性。这也进一步证明了 MODIS 数据在反演 25~30 °C 区间的地表温度时, 具有较高精度^[11]。同时, 本研究还发现, MODIS LST 产品精度不仅受地表类型的影响, 同时还可能受植被盖度和海拔高度的影响。在海拔相对较高的祁连山东段山地草甸上, 由于植被覆盖度较高, MODIS LST 产品会出现低估该地区实际地表温度的情况, 且 MYD11A1 LST 产品与实测数据具有更高的一致性。在海拔最高的祁连山中段高寒草原草地上, 由于地表升温速度慢, 植被类型结构单一, MODIS LST 产品精度较差, 整体高估了该地区的实际地表温度。这也从另一方面说明了 MODIS LST 产品应用于高原冻土等研究中误差较大的问题^[19]。

目前, 对白天和复杂下垫面 LST 产品进行精度检验的工作仍然较少, 特别是在祁连山地区, LST 产品的质量和精度问题比平原等均质区域更为复杂。在 MODIS Terra 和 MODIS/Aqua 白天过境观测时, 地球表面正处在一天中升温较快或最高温的时间段, 这段时间比夜间温度波动更大, 且与站点实际观测时间会存在一定的过境时差。根据统计, 3 个站点实际观测时间与卫星过境的时差在 8 min 以内。通过选取与 MODIS/Terra 和 MODIS/Aqua 卫星过境有不同时差的站点观测数据, 进行对比可以看出, 当选取与 MODIS 过境时差 ≤ 8 min 的站点观测数据时, 观测值与上、下午星 LST 产品采样值的样本数分别为 435 和 415, R^2 分别为 0.707 和 0.752; 当选取与 MODIS 过境时差 ≤ 1 min 的站点观测数据时, 观测值与上、下午星 LST 产品采样值的样本

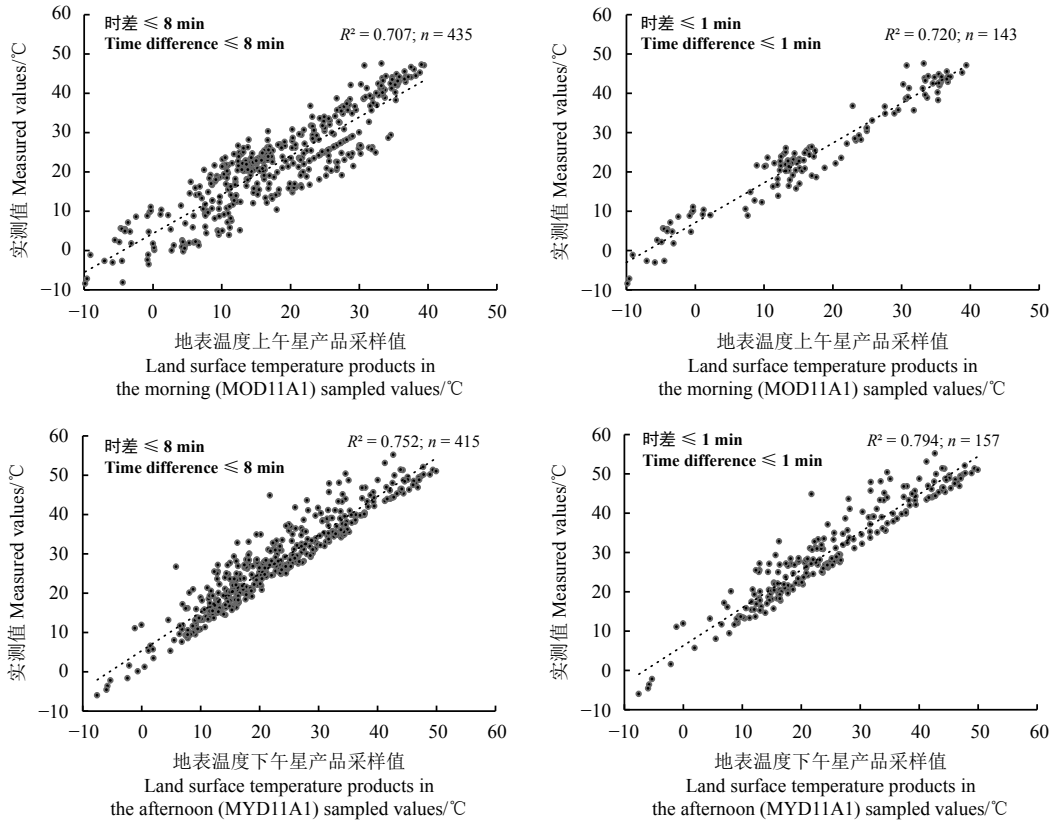


图 7 和中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 卫星过境有不同时间差的站点观测数据与地表温度产品采样值

Figure 7 Comparison of observation data from stations with different time from moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) satellites transit and sampling value of MODIS land surface temperature (LST) products

对分别为 143 和 157, R^2 分别为 0.720 和 0.794 (图 7)。由此可以看出, MODIS 过境时间与站点实际观测数据时间不匹配会引起一定的误差。但是, 为了保证在不同下垫面上拥有足够多的验证样本数据, 本研究采取了尽可能多保留站点观测数据的方法, 这是造成白天数据验证偏差的一个重要来源。因此, 后期在实际使用过程中, 应当进一步采取提高地面观测资料的时间分辨率、增加遥感产品像元尺度内地面观测点数量、亚像元分解等方法对产品精度有进一步的评价、研究, 从而改进 MODIS 反演地表温度算法和产品精度。

本研究通过误差订正可有效提高 MODIS LST 产品在祁连山山地草甸、高寒草地和荒漠草地上的精度, 但仍存在验证点少和验证数据时间序列短等问题, 使得订正公式在各下垫面的普适性还有待更多观测数据加以验证和完善。同时, 用有限足迹范围内的地面测量值来检验像元尺度上的 MODIS LST 产品时, 空间代表性和两套数据集之间的差异均有可能对 MODIS 温度产品精度验证产生影

响。后期仍然需要借助空基遥感平台作为中介桥梁, 进一步开展尺度转换方面的研究, 尽可能减少由空间异质性而引起的误差。

5 结论

为了促进 MODIS 卫星反演 LST 产品在祁连山地区的应用, 本研究利用祁连山不同下垫面上的实测地表温度数据, 对 MODIS LST 日产品 (MOD/MYD11A1) 进行精度验证和适应性分析, 订正 MODIS LST 产品的误差, 得出如下结论:

1) 本研究在祁连山东段山地草甸、中段高寒草地和西段荒漠草地建立的 LST 自动监测站的结果较为稳定, 且符合各下垫面上植被生长特征, 具有较好的代表性, 适合开展祁连山区卫星遥感反演 LST 产品的校验工作。

2) 与 MODIS/Terra (上午星) 相比, 在祁连山东段山地草甸和中段高寒草地上, MYD11A1 LST 产品与实测数据具有较高的时空一致性, RMSE 分别为 5.12 和 6.92 °C。在祁连山西段, MOD11A1 LST

产品与实测数据具有较高的时空一致性, Pa、Pd 和 RMSE 分别为 1.62、2.89 和 3.88 °C。

3) MODIS LST 产品精度不仅受下垫面类型的影响, 同时还受植被盖度和海拔高度的影响。当在海拔相对较低、植被较少的荒漠草地上, MODIS LST 产品具有较高的精度。在海拔相对较高的祁连

山东段山地草甸和中段高寒草原草地上, 由于地表升温速度慢, 植被盖度较高, MODIS LST 产品精度较低, 且整体高估了该地区的实际地表温度。

4) 误差订正有效提高了 MODIS LST 产品在祁连山山地草甸、高寒草地和荒漠草地上的精度, RMSE 分别由 5.12、6.92 和 3.88 °C 降低到 3.83、4.26 和 2.97 °C。

参考文献 References:

- [1] 李召良, 唐伯惠, 唐荣林, 吴骅, 段四波, 冷佩, 张仁华. 地表温度热红外遥感反演理论与方法. 科学观察, 2017, 12(6): 57-59.
LI Z L, TANG B H, TANG R L, WU H, DUAN S B, LENG P, ZHANG R H. Theory and method for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data. *Science Focus*, 2017, 12(6): 57-59.
- [2] 肖志强, 王锦地, 王森. 中国区域 MODIS LAI 产品及其改进. 遥感学报, 2008, 12(6): 993-1000.
XIAO Z Q, WANG J D, WANG S. Improvement of MODIS LAI product in China. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 993-1000.
- [3] LI Z L, TANG B H, WU H, REN H Z, YAN G J, WAN Z M. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 14-37.
- [4] 柯灵红, 王正兴, 宋春桥, 卢振权. 青藏高原东北部 MODIS LST 时间序列重建及与台站地温比较. 地理科学进展, 2011, 30(7): 819-826.
KE L H, WANG Z X, SONG C Q, LU Z Q. Reconstruction of MODIS LST time series and comparison with land surface temperature among observation stations in the northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 819-826.
- [5] 王宾宾, 马耀明, 马伟强. 青藏高原那曲地区 MODIS 地表温度估算. 遥感学报, 2012, 16(6): 1289-1309.
WANG B B, MA Y M, MA W Q. Estimation of land surface temperature retrieved from EOS/MODIS in Naqu area over Tibetan Plateau. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(6): 1289-1309.
- [6] 周曙光, 张耀生, 赵新全, 米兆荣. 基于 MODIS 数据的黄河源区近地表气温遥感反演. 草业科学, 2011, 5(7): 1229-1233.
ZHOU S G, ZHANG Y S, ZHAO X Q, MI Z R. Retrieving of near land surface temperature in the source region of Yellow River with remote sensing. *Pratacultural Science*, 2011, 5(7): 1229-1233.
- [7] 王润科, 王建, 李弘毅, 郝晓华, 马佳培. 基于 Landsat ETM+遥感数据的组分温度反演方法研究. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 571-582.
WANG R K, WANG J, LI H Y, HAO X H, MA J P. Retrieval of component temperatures based on Landsat-7 ETM+remote sensing data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3): 571-582.
- [8] YU W P, MA M G, WANG X F, TAN J. Estimating the land-surface temperature of pixels covered by clouds in MODIS products. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083525.
- [9] 闵文彬, 李跃清, 周纪. 青藏高原东侧 MODIS 地表温度产品验证. 高原气象, 2015, 34(6): 3-8.
MIN W B, LI Y Q, ZHOU J. Validation of MODIS land surface temperature products in east of the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(6): 3-8.
- [10] WAN Z, ZHANG Y, ZHANG Q, LI Z L. Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 163-180.
- [11] CASELLES V, COLL C, GALVE J, VALOR E, RAQUEL N, JUAN M S. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 288-300.
- [12] WANG W, LIANG S, MEYERS T. Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 623-635.
- [13] SABOL D E, GILLESPIE A R, ABBOTT E, YAMADA G. Field validation of the aster temperature-emissivity separation algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 2328-2344.

- [14] WAN Z M, LI Z L. Radiance-based validation of the v5 MODIS land-surface temperature product. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29: 5373-5395.
- [15] WAN Z M. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 36-45.
- [16] QIAN Y G, LI Z L, NERRY F. Evaluation of land surface temperature and emissivities retrieved from MSG/SEVIRI data with MODIS land surface temperature and emissivity products. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 34: 3140-3152.
- [17] 王之夏, 南卓铜, 赵林. MODIS 地表温度产品在青藏高原冻土模拟中的适用性评价. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 132-143.
WANG Z X, NAN Z T, ZHAO L. The applicability of MODIS land surface temperature products to simulating the permafrost distribution over the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 132-143.
- [18] 邹德富, 赵林, 吴通华, 吴晓东, 庞强强, 乔永平. MODIS 地表温度产品在青藏高原连续多年冻土区的适用性分析. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 308-317.
ZOU D F, ZHAO L, WU T H, WU X D, PANG Q Q, QIAO Y P. Assessing the applicability of MODIS land surface temperature products in continuous permafrost regions in the central Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 308-317.
- [19] 石亚亚, 杨成松, 车涛. MODIS LST 产品青藏高原冻土图的精度验证. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 70-78.
SHI Y Y, YANG C S, CHE T. Accuracy verification of the Tibetan Plateau permafrost map based on MODIS LST product. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 70-78.
- [20] 李召良, 段四波, 唐伯惠, 吴骅, 任华忠, 阎广建. 红外地表温度遥感反演方法研究进展. *遥感学报*, 2016, 20(5): 899-920.
LI Z L, DUAN S B, TANG B H, WU H, REN H Z, YAN G J. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 899-920.
- [21] 战川, 唐伯惠, 李召良. 近地表大气逆温条件下的地表温度遥感反演与验证. *遥感学报*, 2018, 22(1): 28-37.
ZHAN C, TANG B H, LI Z L. Retrieval and validation of land surface temperature for atmospheres with air temperature inversion. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 28-37.
- [22] 孟翔晨, 历华, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 李彬. Landsat 8 地表温度反演及验证-以黑河流域为例. *遥感学报*, 2018, 22(5): 857-871.
MENG X C, LI H, DU Y M, CAO B, LIU Q H, LI B. Retrieval and validation of the land surface temperature derived from landsat 8 data: A case study of the Heihe River Basin. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(5): 857-871.
- [23] 郭妮, 杨兰芳, 李民轩. 利用气象卫星资料研究祁连山区植被和积雪变化. *应用气象学报*, 2003, 6: 702-709.
GUO N, YANG L F, LI M X. Study of changes of vegetation and snow area in Qilian Mountains using meteorology satellite data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 6: 702-709.
- [24] 康宝天, 侯扶江, Saman BOWATTE. 祁连山高寒草甸和荒漠草原土壤细菌群落的结构特征. *草业科学*, 2020, 37(1): 10-19.
KANG B T, HOU F J, BOWATTE S. Characterization of soil bacterial communities in alpine and desert grasslands in the Qilian Mountain range. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 10-19.
- [25] 闫月娥, 王建宏, 石建忠, 周晓雷, 吴小舟, 吕子君, 陈道军, 魏秀元, 李健, 朱燕. 祁连山北坡草地资源及退化现状分析. *草业科学*, 2010, 4(7): 24-29.
YAN Y E, WANG J H, SHI J Z, ZHOU X L, WU X Z, LYU Z J, CHEN D J, WEI X Y, LI J, ZHU Y. Analysis on grassland resources and their deterioration situation on North Slope of Qilian Mountains. *Pratacultural Science*, 2010, 4(7): 24-29.
- [26] 刘钟龄. 中国草地资源现状与区域分析. 北京: 科学出版社, 2017.
LIU Z L. Current Situation and Regional Analysis of Grassland Resources in China. Beijing: China Science Publishing, 2017.
- [27] WAN Z M, DOZIER J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892-905.
- [28] WAN Z M. MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide Collection 6. (2013-12-20) [2016-10-11]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/118/MOD11_User_Guide_V6.

(责任编辑 王芳)