

基于MODIS数据的2023年甘肃积石山Ms6.2地震热红外异常检测研究

李怡馨

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年6月5日; 发布日期: 2026年6月17日

摘要

为探究2023年甘肃积石山Ms6.2地震前后地表热红外异常的时空演化特征, 本文以积石山及其邻区为研究对象, 选取2023年11月至2024年2月的MODIS热红外数据, 采用劈窗算法反演地表温度, 并构建历史同期背景场, 结合背景差值与逐像元统计方法提取热异常信息。在此基础上, 分析白天与夜间地表温度分布、昼夜温差及相对背景场偏离的空间特征, 并通过时间序列对异常的阶段性演化进行刻画。结果表明: (1) 研究区地表温度具有明显的地形控制效应, 白天温度整体高于夜间, 低温区主要分布在高海拔或阴影区, 高温区集中于低海拔或开阔地带; (2) 震前阶段Td-Tn与Tn-Tnm异常增强且具有一定连续性, 震区附近出现相对突出的温差异常; (3) 时间序列中, Mean (Tn-Tnm)在震前出现明显突变, Slope指标在临震前后发生由正转负或由负转正的变化, 震后仍呈一定波动并逐步趋稳。研究表明, 夜间温度相对背景场的偏离对地震过程响应更敏感, 基于MODIS的热红外异常检测可为地震热异常识别与时空演化分析提供参考。

关键词

2023年甘肃积石山Ms6.2地震, 地表温度, 热异常, MODIS

Thermal Infrared Anomaly Detection of the 2023 Gansu Jishishan Ms6.2 Earthquake Based on MODIS Data

Yixin Li

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: April 9, 2026; accepted: June 5, 2026; published: June 17, 2026

Abstract

To investigate the spatiotemporal evolution characteristics of surface thermal infrared anomalies

before and after the 2023 Jishishan, Gansu Province, Ms6.2 earthquake, this study takes Jishishan and its adjacent areas as the research region. MODIS thermal infrared data from November 2023 to February 2024 were selected, and the split-window algorithm was employed to retrieve land surface temperature (LST). A historical synchronous background field was constructed, and thermal anomaly information was extracted using background differencing combined with pixel-by-pixel statistical methods. On this basis, the spatial characteristics of daytime and nighttime LST distribution, diurnal temperature difference, and deviations from the background field were analyzed, and the staged evolution of anomalies was characterized through time series analysis. The results indicate that: (1) LST in the study area is significantly controlled by topography, with overall higher daytime temperatures than nighttime temperatures; low-temperature zones are mainly distributed in high-altitude or shaded areas, while high-temperature zones concentrate in low-altitude or open areas; (2) during the pre-seismic stage, Td-Tn and Tn-Tnm anomalies were enhanced and showed certain continuity, with relatively prominent temperature difference anomalies appearing near the epicentral area; (3) in the time series, Mean (Tn-Tnm) exhibited obvious abrupt changes before the earthquake, and the Slope indicator showed transitions from positive to negative or vice versa around the time of the earthquake, with certain fluctuations persisting after the earthquake and gradually stabilizing. This study demonstrates that nighttime temperature deviations from the background field are more sensitive to the earthquake process, and MODIS-based thermal infrared anomaly detection can provide reference for earthquake thermal anomaly identification and spatiotemporal evolution analysis.

Keywords

2023 Gansu Jishishan Earthquake Ms6.2, Land Surface Temperature, Thermal Anomaly, MODIS

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震作为突发性自然灾害之一,其孕震与发震过程常伴随地表能量交换和热场演化异常[1],热红外遥感因具备大范围、连续观测与敏感性强等优势,已成为地震前兆信息提取与异常识别的重要技术手段[2]。在多种遥感数据中,MODIS 具备较高的时间分辨率与稳定的数据质量,可连续获取地表热红外信息,为地震热异常时空变化研究提供了可靠数据基础。建立适用于 MODIS 数据的地表温度反演与异常提取方法,不仅有助于提高地震热异常检测的精度,也可为地震预警与灾害评估提供重要参考。

现有地震热红外异常研究主要包括地表温度反演与异常信息提取两方面。异常识别方面,早期多采用图像差分或阈值判别方法[3],但该类方法容易受到季节变化、地形起伏、地表覆被差异以及气象过程的干扰,导致异常稳定性不足。为提升识别可靠性,近年来研究倾向于构建历史同周期背景场,以削弱非构造性扰动,并结合时序分析方法对热异常的持续性与演变过程进行综合判别。温度反演方法中,劈窗算法因参数少、适用性强、反演精度高而被广泛采用,尤其适合 MODIS 第 31、32 波段的地表温度反演;异常信息提取方面,传统方法受气候背景、地形与大气影响较大,导致异常识别稳定性不足。基于背景场差值与逐像元统计的方法被用于降低非构造因素干扰。然而,不同地区地形条件与热场响应存在显著差异,如何构建适合特定区域的热异常识别流程仍需进一步研究。

甘肃积石山地区位于青藏高原东北缘的过渡地带,地形起伏大、地表覆盖类型多样,热场背景复杂,具有典型的地震热异常研究条件。2023 年 12 月 18 日积石山 Ms6.2 级地震为该区提供了重要研究案例

[4]。基于此,本文以积石山及其邻近区域为研究对象,选取2023年11月至2024年2月的MODIS热红外数据,利用劈窗算法反演地表温度,并通过背景场差值与逐像元统计方法构建热异常指标体系,分析震前与震后热红外异常的时空分布与时间演化特征,旨在为地震热异常识别与灾害监测提供方法参考与案例支撑。

2. 研究区与数据来源

2.1. 研究区概况

甘肃积石山 Ms6.2 地震研究区位于甘肃省临夏回族自治州积石山县及其周边,地处青藏高原东北缘过渡带,震中 35.7°N , 102.7°E , 选取其周边区域 $35^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $102^{\circ}\sim 104^{\circ}\text{E}$ 作为热红外异常检测的研究范围。该地区地形起伏明显,地表下垫面类型多样,同时地震发生在冬季,区域受季节性降温、昼夜温差等因素影响,地表温度背景场波动较大,容易对震前热红外异常识别造成干扰。因此,在该研究区开展基于 MODIS 数据的震前热红外异常检测,既能覆盖震中影响范围,也能检验复杂地形背景条件下异常提取的有效性与稳定性,研究区位置如图 1 所示。

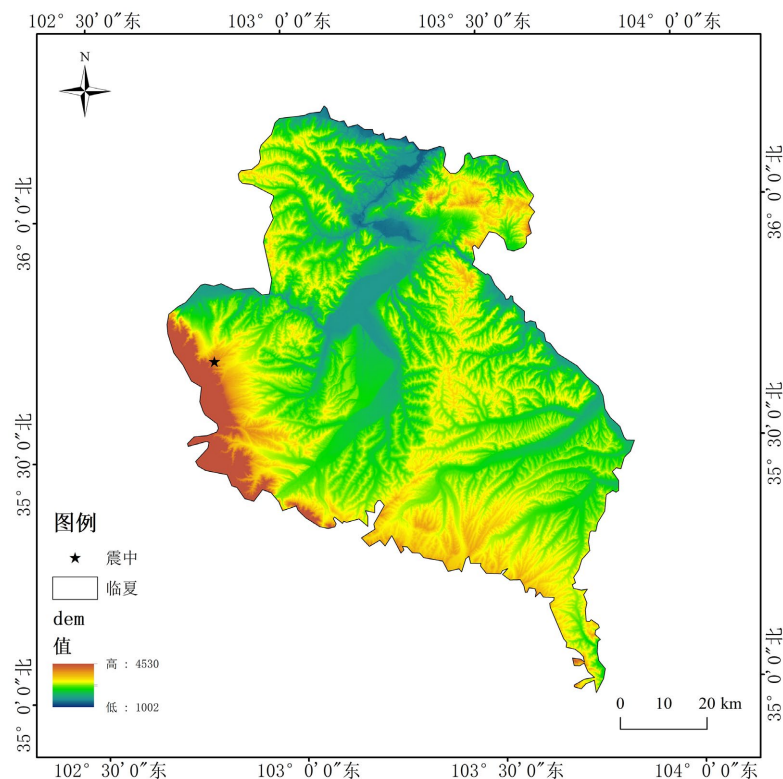


Figure 1. Location of study area

图 1. 研究区位置

2.2. 数据来源

研究使用的 MODIS 数据来源于美国国家航空航天局(NASA, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提供的 MOD021KM 产品。MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪) 搭载于太阳同步极轨卫星,具有 36 个离散波段,光谱覆盖范围约 $0.4\sim 14.4\ \mu\text{m}$, 可为地震热红外异常监测提供多波段热辐射信息支撑[5]。MOD021KM 为 1 km 分辨率的 L1B 定标辐亮度产品,由 MODIS Level-

1A 原始扫描数据经辐射定标与地理定位处理生成，并附带质量标识、误差估计与定标信息等辅助数据。为获取更精确的像元地理定位与观测几何信息，研究中可配套使用 MODIS Level-1 地理定位产品 MOD03 进行几何与坐标匹配处理。

3. 研究方法

3.1. 技术流程

基于 MODIS 数据的积石山 Ms6.2 地震热红外异常检测研究内容与包括以下方面：首先，获取震前、震后 MOD021KM 及配套地理定位产品 MOD03，完成波段提取、辐射定标、几何校正、投影转换，并结合质量标识进行云及无效像元剔除，形成可用于反演的热红外通道数据；其次，采用劈窗算法反演地表温度，估算地表比辐射率，并利用水汽敏感波段(2、19 波段)反演大气水汽含量，进一步由水汽含量估算大气透过率，随后基于普朗克函数将 31、32 波段辐亮度转换为亮温，并将参数代入劈窗模型得到研究区地表温度，生成多期地表温度空间分布图；最后，构建震前、震后地表温度时间序列，计算均值、极差、标准差及变化趋势等统计量以表征背景场与波动特征，并据此提取潜在热异常区域；最后，结合震中位置与时间窗口对热异常的时空演化进行综合对比分析与结果验证，形成地震热红外异常检测结论。技术流程如图 2 所示。

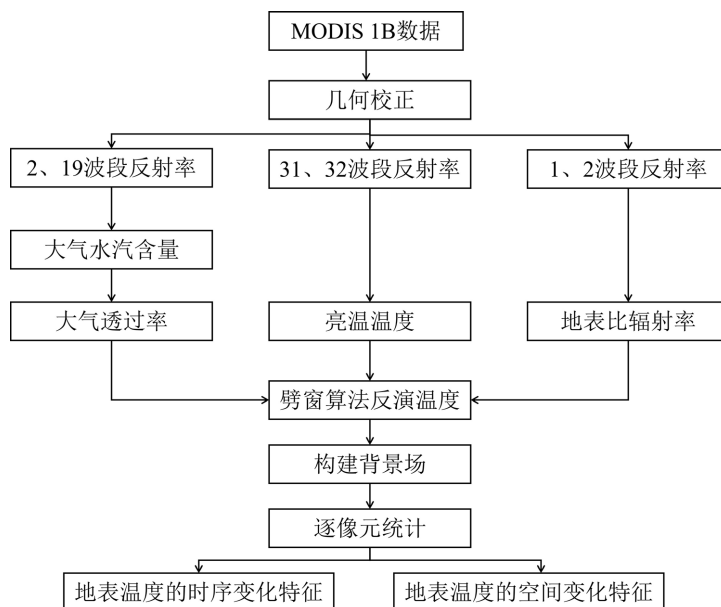


Figure 2. Technical process

图 2. 技术流程

3.2. 劈窗算法反演温度

劈窗算法主要是针对 NOAA-AVHRR 的热红外通道 4 和 5 的数据推导而来，是目前发展最成熟的地表温度反演算法[6]。MODIS 的第 31 和 32 波段很接近于 AVHRR4 和 5 通道的波段范围，也可以采用此算法反演地表温度。劈窗算法消除了大气平均温度的影响，所需参数都可以从 MODIS 的其他波段数据中反演出来，不需要其他额外的信息就可以进行地表温度的反演[7]。采用此劈窗算法来反演积石山地区的地表温度。

3.2.1. 亮温计算

MODIS 数据是用 DN 值表示的，因此，计算星上亮温须先将 DN 值转换成相应的辐射强度，然后再用 Planck 函数求星上亮温。计算公式为：

$$rad_i = scales_i (DN_i - offsets_i) \quad (1)$$

$$T_i = \frac{K_{i,1}}{\ln(1 + K_{i,2}/rad_i)} \quad (2)$$

其中, $I = 31、32$, rad 为辐射强度, $scales$, $offsets$ 为辐射标定系数; $K_{i,1}$, $K_{i,2}$ 为常数。

3.2.2. 大气透过率计算

大气透过率是地表辐射、反射透过大气到达传感器的能量与地表辐射、反射能的比值, 它与大气状况、高度等因素有关, 在大气透过率的计算过程中, 水汽含量是主要的考察因素。通常的做法就是通过大气模型软件模拟大气透过率与大气水汽含量之间的关系, 其拟合关系为:

$$\tau_{31} = 2.89798 - 1.88366 \times \exp\{-[w/(-21.22704)]\} \quad (3)$$

$$\tau_{32} = -3.59289 + 4.60414 \times \exp\{-[w/(-32.70639)]\} \quad (4)$$

由于卫星过境时水汽含量的测量比较困难, 要获得大面积的水汽分布因更不现实, 所以采用波段比的方法来反演水汽含量。利用 MODIS 第 2 和第 19 波段进行大气水汽含量的反演:

$$w = \left\{ \frac{\alpha - \ln(\rho_{19} - \rho_2)}{\beta} \right\}^2 \quad (5)$$

式中, w 是指大气水汽含量, α 、 β 是常数, 分别取 $\alpha = 0.02$, $\beta = 0.651$, ρ_2 、 ρ_{19} 分别是 MODIS 第 2 波段和第 19 波段的地面反射率。

3.2.3. 地表比辐射率计算

在采用劈窗算法反演地表温度的过程中, 地表比辐射率是最重要的参数之一[8], 它直接影响着地表温度的精度, 因此合理的估算地表比辐射率是精确的反演地表温度的关键。本文采用地物监督分类方法对地表进行估算, 通过现有的地物分类数据等先验知识, 选定特定区域作为训练样本进行监督分类, 估算每像元的地表比辐射率, 其计算公式如下:

$$\varepsilon_i = P_v R_{veg} \varepsilon_{iveg} + (1 - P_v) R_{soil} \varepsilon_{isoil} + d_\varepsilon \quad (6)$$

式中, ε_{31veg} 、 ε_{32veg} 、 ε_{31soil} 和 ε_{32soil} 分别取值 0.98672、0.98990、0.96767、和 0.9979。 P_v 为植被覆盖度, R_{veg} 和 R_{soil} 分别为植被和裸土的辐射比率, 由植被覆盖度计算所得。其计算公式如下:

$$d_\varepsilon = 0.003796 \min[P_v, (1 - P_v)] \quad (7)$$

$$R_{veg} = 0.92762 + 0.07033P_v \quad (8)$$

$$R_{soil} = 0.99782 + 0.08362P_v \quad (9)$$

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (10)$$

3.3. 热异常信息提取

近年来相关研究主要聚焦于地表热异常提取方法, 已从早期图像定向提取发展到异常评价指标体系。但遥感影像易受气象、地质与地形等因素影响, 噪声较多, 如何剔除无用信息仍是研究重点。现有方法各有优缺点: 图像差值法易受背景干扰; 断层内外差值法依赖断裂信息; 透热指数法对短临异常解释不足; 亮温增温异常点比值法仍受天气影响。因此, 首先构建背景场去除多余的干扰因素, 再用逐像元统计方法来提取地震异常信息。

3.3.1. 背景差值计算

地震热红外异常检测需剔除季节、气候、地形等非构造噪声，历史同期背景场是核心基础。选取2018~2022年共5年同期MOD021KM地表温度产品，时间窗口锁定为每年11月1日至次年2月28日，与研究时段严格对应，保证季节与气候背景一致性。同时筛选单景影像云覆盖低于10%的影像，剔除厚云、卷云与云阴影污染像元，保留MODIS官方质量控制标识为高质量的有效像元。

全球任一位置 (x, y) 处，地表温度背景场 $T(x, y, t)$ N 年历史数据的同期均值，计算公式如下：

$$T(x, y, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} T(x, y, t) \quad (11)$$

式中： N 为可用数据年限； $T(x, y, t)$ 为研究区位置 (x, y) 处第 i 年 t 时刻的地表温度观测值。提取地震异常的获取是在背景场研究的基础上进行，利用了背景场差值法，求出地震前后数据和背景场的差值，据此对地表温度的相对变化进行分析。它的主要特征是兼顾了地表温度的正常分布，能够反映出不正常的增温幅度以及增温面积。

3.3.2. 逐像元统计法

在除去地表温度背景场值后得到的温度数据的基础上，提取地表温度热异常时空变化的统计参数，主要统计参数有：平均值(Mean)和趋势分析法(Slope)。平均值是指几个不等数的总和除以这些数得出来的数目；数值范围是指最大值和最小值之差；趋势分析方法是指以线性趋势估计为参考，计算每个像素在指定统计范围内的地表温度线性趋势率。

4. 实验结果与分析

4.1. 温度反演结果

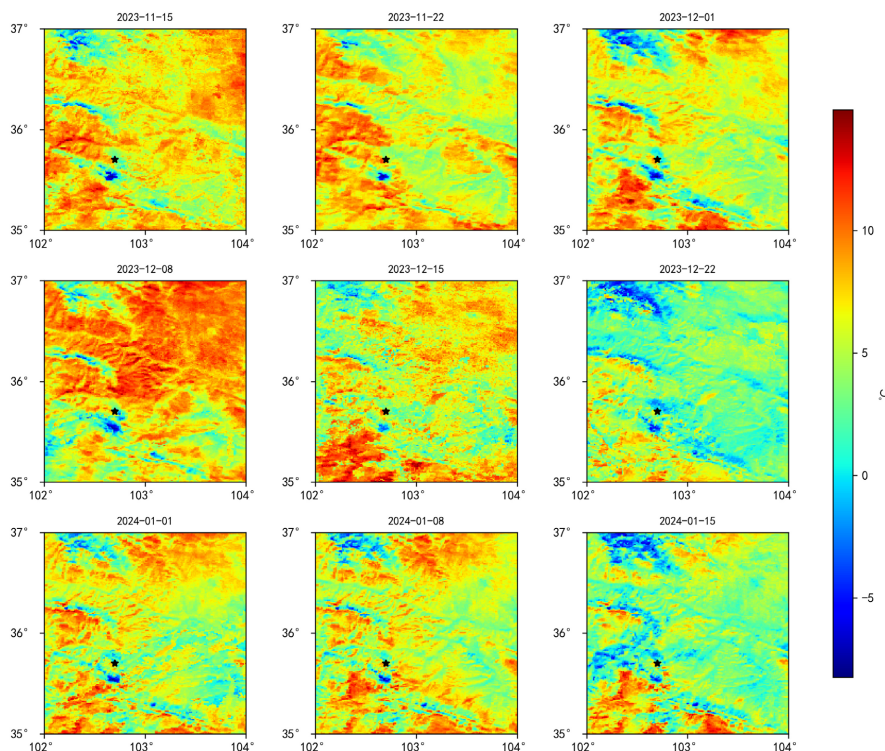


Figure 3. Daytime land surface temperature
图 3. 白天地表温度

根据劈窗算法反演出的地表温度结果如图 3、图 4 所示。研究区白天与夜间地表温度具有明显的时空差异与阶段性变化。白天地表温度整体偏高，空间分布呈现明显的地形分异特征，低温区多位于高海拔或植被覆盖较好的区域，高温区主要分布在低海拔、裸地。部分日期在震区附近出现局部高温条带或斑块，表现出一定的时序变化特征。夜间温度整体降低，冷区范围扩大，高温区明显收缩。夜间温度场更加平滑，但局部仍可观察到热异常区域，特别是在震区及其周边表现出持续偏高或偏低的温度残差。

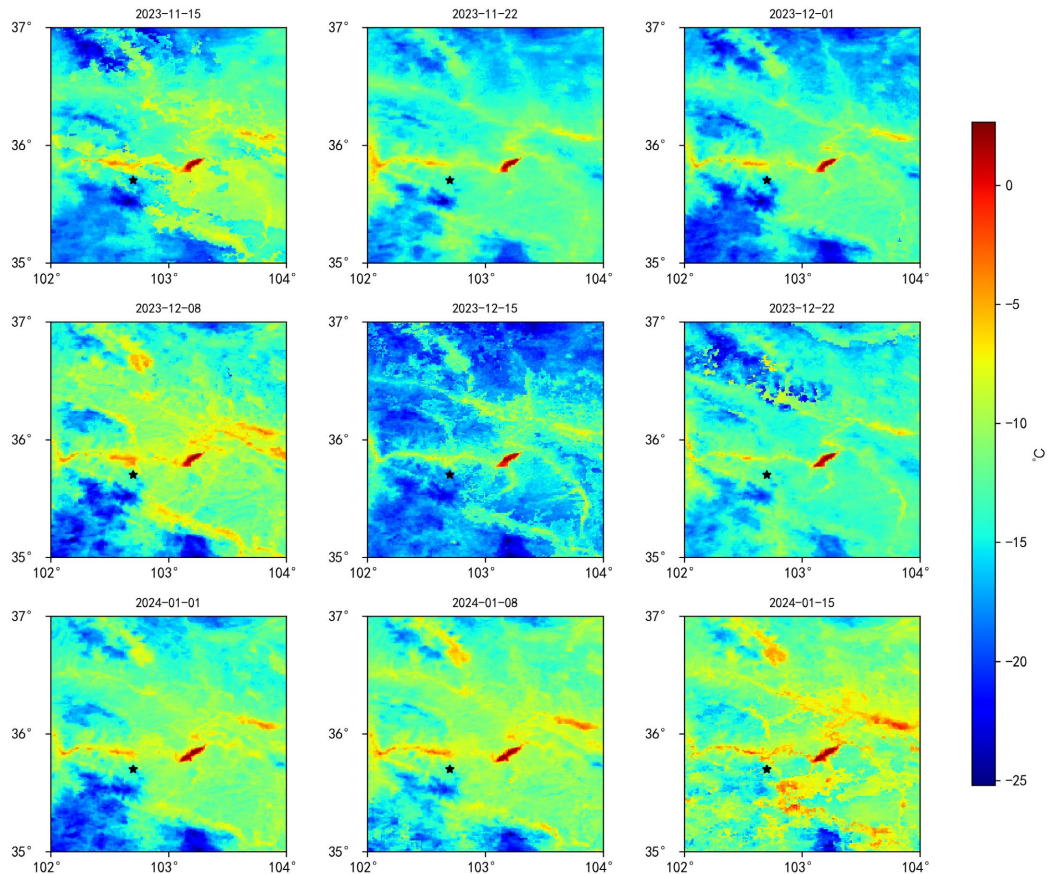


Figure 4. Nighttime land surface temperature
图 4. 夜间地表温度

4.2. 地表温度变化特征

使用 T_d 表示白天地表温度值； T_{dm} 表示白天地表温度平均值； T_n 表示夜间地表温度值； T_{nm} 表示夜间地表温度平均值； $T_d - T_{dm}$ 表示用白天的地表温度值减去白天的地表温度平均值； $T_d - T_n$ 表示用白天的地表温度值减去夜间地表温度值。积石山 2023 年 Ms6.2 级地震地表温度 $T_d - T_{dm}$ 指标的空间分布如图 5 所示。 $T_d - T_{dm}$ 指标异常高值在部分日期具有一定的聚集性，且与地形起伏或构造带走向具有较好的对应关系；低值区多分布于高海拔或阴影区，表明白天温度异常受地形与地表覆被影响显著。

$T_d - T_n$ 指标显示昼夜热场差异较大，整体变化幅度明显高于 $T_d - T_{dm}$ 。高温差区在不同日期有一定连续性，反映出地表热惯量差异和局部能量交换的增强；震区附近在部分时段出现相对突出的温差异常，提示其可能与构造活动或地表热状态变化有关。总体来看，白天温度异常与昼夜温差均具备较稳定的空间分布特征，且在震前时段表现出一定的异常增强趋势。积石山 2023 年 Ms6.2 级地震地表温度 $T_d - T_n$ 指标的空间分布如图 6 所示。

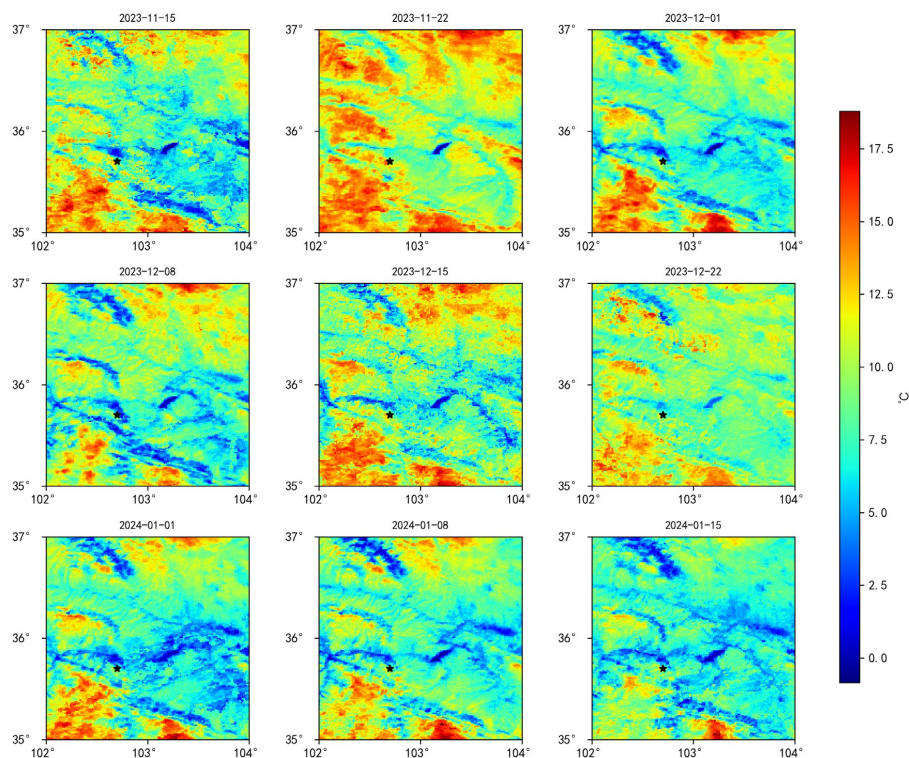


Figure 5. Spatial distribution of Td-Tdm land surface temperature indicators for the 2023 Jishishan Ms6.2 earthquake
图 5. 积石山 2023 年 Ms6.2 级地震地表温度 Td-Tdm 指标的空间分布

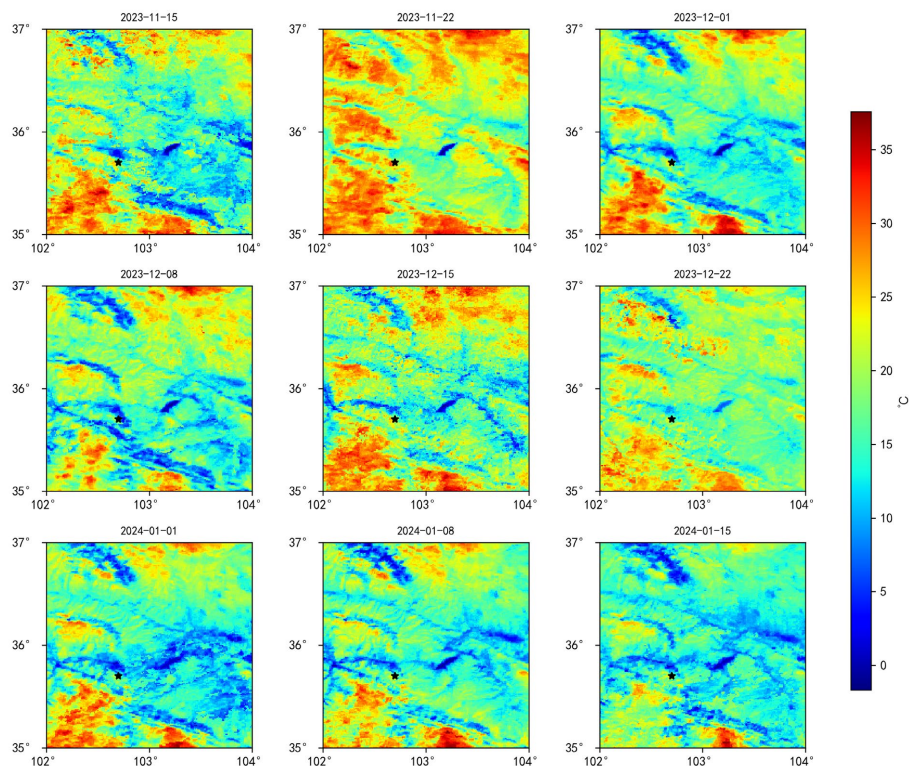


Figure 6. Spatial distribution of Td-Tn land surface temperature indicators for the 2023 Jishishan Ms6.2 earthquake
图 6. 积石山 2023 年 Ms6.2 级地震地表温度 Td-Tn 指标的空间分布

4.3. 时间演化特征分析

使用时间范围 2023 年 11 月到 2024 年 2 月的数据做出震前 2 个月和震后 2 个月在两个指标地表温度值随时间的变化特征。从两个指标地表温度时间序列变化来看, 积石山 Ms6.2 级地震前后地表温度演化具有一定的阶段性和波动性特征, 具体的地表温度随时间变化的指标如图 7 所示。震前两个月内, Mean (Td-Tn)整体处于较高波动状态, 在震前一段时间出现起伏增强现象; Mean (Tn-Tnm)在震前表现出较明显的异常波动, 并在临震前后出现突变, 说明夜间地表温度相对背景场的偏离更加敏感。与此同时, Slope (Td-Tn)和 Slope (Tn-Tnm)在震前也表现出一定幅度的变化, 尤其在震前短时间内出现由正转负或由负转正的波动过程, 反映出地表热状态变化趋势在地震发生前后存在调整。地震发生后, 各指标并未立即恢复平稳, 而是在震后一段时间内仍保持较强波动, 随后逐渐趋于相对稳定。总体而言, 研究区地表温度在震前、震时和震后表现出较为连续的动态演化过程, 其中昼夜温差和夜间温度相对背景场的变化对地震过程响应较为明显, 可为地震热异常识别与时间演化分析提供一定参考。

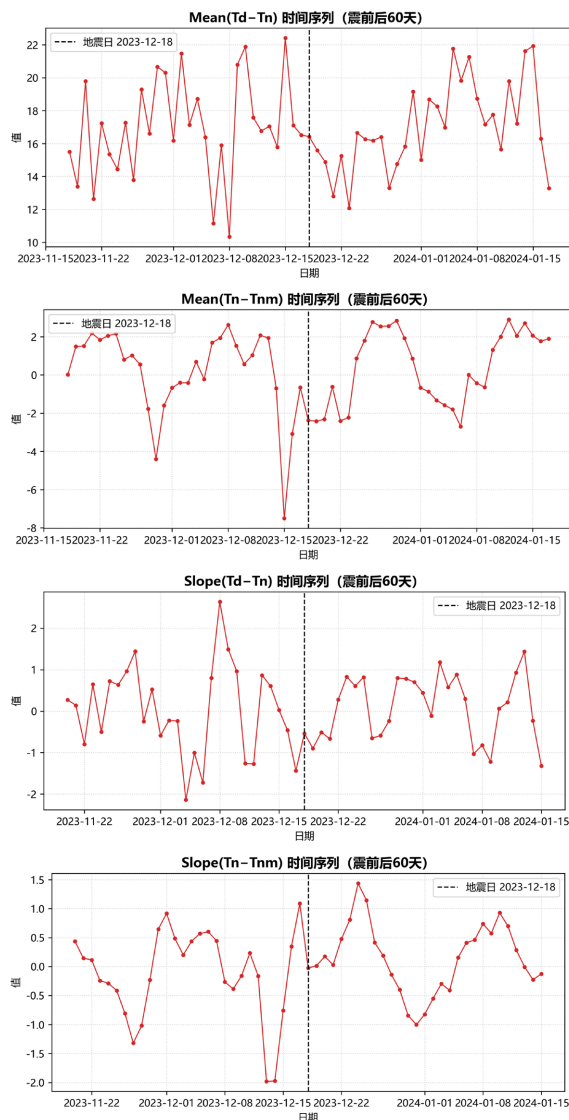


Figure 7. Temporal variations of different land surface temperature indicators for the 2023 Jishishan Ms6.2 earthquake
图 7. 积石山 2023 年 Ms6.2 级地震地表温度不同指标的时间变化

5. 结论

以甘肃省积石山地震震中区域为研究区, 结合历史 MODIS 数据基于劈窗算法反演了地表温度, 并检测地震前热异常, 主要结论如下:

(1) 基于 MODIS 数据与劈窗算法反演的地表温度结果显示, 积石山区域昼夜温度场具有显著时空差异, 白天地表温度总体高于夜间, 低温区主要分布在高海拔或阴影区, 高温区多出现在低海拔或地形开阔区域, 表明地形与地表覆被对热场分布具有重要控制作用。

(2) 热异常指标分析表明, T_d-T_{dm} 与 T_d-T_n 均呈现明显的空间分异与阶段性变化特征, 其中 T_d-T_n 异常幅度更大, 异常区在部分时段具有一定连续性, 震区附近在震前出现相对突出的温异常, 提示地震活动可能与局部热场增强存在关联。

(3) 时间演化特征分析显示, 震前两个月内各指标总体波动增强, 震后阶段波动仍持续一段时间后趋于稳定, 反映出地表热场对地震过程具有较为连续的响应特征, 且夜间温度相对背景场的变化对地震过程更为敏感。

参考文献

- [1] 刘甲美, 王涛, 范鹏举, 等. 2023 年甘肃积石山 Ms6.2 地震区域地震动地形效应与诱发滑坡评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2026, 37(2): 26-40.
- [2] 刘欢, 曹思琦, 杨俊泉, 等. 基于 Landsat 8 劈窗算法的北极海冰表面温度反演[J]. 华北地质, 2025, 48(3): 1-9.
- [3] 林峰, 王博, 刘航. MODIS 数据在秸秆焚烧监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(S1): 166-168+172.
- [4] 孙玺皓, 张丽峰, 胡维云, 等. 2023 年积石山 Ms6.2 地震地球物理异常时空演化特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2025, 46(5): 45-50.
- [5] 杜宸, 孙珂. 基于不同时空尺度多源遥感数据的新疆于田地区地震热异常分析[J]. 地震, 2022, 42(3): 37-51.
- [6] 葛强, 沈文举, 李冉, 等. 2001-2018 年我国热异常点时空分布特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 73-84.
- [7] 买合木提江·维吉旦, 玉素甫江·如素力, 仇忠丽, 等. 基于 MODIS 数据的伽师—阿图什交界 MS5. 8 地震热红外异常检测研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 227-235.
- [8] 薛治国, 刘海燕, 许善洋, 等. 皮山 6.5 级地震前地表 MODIS 热红外异常与气象台站记录对比[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(10): 8-10.