

2022年6月阿富汗帕克提卡M6.0级地震前微波亮温异常的多态性及其归因辨析

丁逸凡, 吴立新, 齐源, 毛文飞

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 地灾感知认知预知研究室, 长沙 410083

摘要: 阿拉伯板块持续向北挤压欧亚板块, 促使阿富汗—巴基斯坦边境应力场变化、局部闭锁和破裂失稳, 导致2022年6月21日发生了6.0级帕克提卡浅源地震, 这是该地区近10年发生的最大地震。本文利用GCOM-W1卫星AMSR-2微波辐射计观测的微波亮温(MBT)数据, 运用时空加权两步法提取了地震前后、震中周边超百万 km^2 范围内的MBT残差, 揭示了MBT时空演变特征与异常现象的多态性。联合降雨、土壤湿度及 CH_4 、 CO 温室气体卫星观测数据, 结合区域地质条件和地表覆盖类型, 逐一进行了多态MBT正异常的归因辨析。研究表明: (1) 震中东南部印度河平原和西北部卡拉库姆沙漠显现MBT正异常, 可归因于孕震应力激活的岩石空穴粒子(P-hole)从孕震区向上传递到第四系盖层, 导致地表浅层介电常数降低; (2) 临震期高山地区显现MBT正异常, 可归因于应力激活的P-hole向高山低温区传递, 并聚集在砂性沉积岩盖层, 致使砂性盖层微波介电常数降低; (3) 震中西北部沿赫拉特断裂带显现MBT正异常, 与临震期断层拉张有关, 可能受到煤系 CH_4 、 CO 沿断层与矿井逸出产生的温室效应影响。本研究对于西亚地区地震微波遥感观测及地震异常识别有重要意义, 对全球其他地区的地震遥感监测及异常认知也有参考价值。

关键词: 遥感, 微波亮温, 地震异常, P-hole, 微波介电, 温室效应, 地应力场变化

中图分类号: P237/P2

引用格式: 丁逸凡, 吴立新, 齐源, 毛文飞. 2024. 2022年6月阿富汗帕克提卡M6.0级地震前微波亮温异常的多态性及其归因辨析. 遥感学报, 28(10): 2621-2631

Ding Y F, Wu L X, Qi Y and Mao W F. 2024. Discriminating the polymorphism and attribution of microwave radiation anomalies related to the June 2022 Mw 6.0 Paktita earthquake in Afghanistan. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2621-2631 [DOI: 10.11834/jrs.20243019]

1 引言

通常认为, 地震是因板块间相对运动造成板块边缘及内部发生错动和破裂, 致使地壳在快速释放能量的过程中造成的震动。自Gorný等(1988)发现中亚地区震前普遍存在热红外辐射增强现象后, 利用卫星热红外遥感进行震前亮温包括红外亮温IBT (Infrared Brightness Temperature) 和微波亮温MBT (Microwave Brightness Temperature) 的异常探测研究发展迅速。地震发生时往往伴随恶劣天气条件, 红外传感器因波长较短, 在云雨天气

条件下无法有效获取地面IBT; 而被动微波信号可在一定程度上穿透云层、并反映地表一定深度的辐射信息, 使得被动微波卫星遥感不受或少受天气条件限制, 具有全天候观测的特点 (Ulaby and Long, 2015), MBT已广泛用于震前亮温异常观测研究。

Maeda和Takano率先利用卫星微波辐射数据、提出异常检测算法研究了2008年汶川地震 (Maeda和Takano, 2010) 和2004年摩洛哥地震 (Maeda和Takano, 2009) 之前的辐射变化, 发现震中附近均显现了显著的微波辐射正异常。基于该检测算法,

收稿日期: 2023-01-20; 预印本: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(编号: 41930108); 国家重点研发计划(编号: 2018YFC15035); 战略性科技创新合作重点专项(编号: 2023YFE020800); 中南大学研究生自主探索创新项目(编号: 2023ZZTS0703)

第一作者简介: 丁逸凡, 研究方向为地震微波遥感。E-mail: dyfz2019@163.com

通信作者简介: 吴立新, 研究方向为地学三维建模、遥感岩石力学、数字矿山、地灾感知认知、亚热带遥感。E-mail: wulx66@csu.edu.cn

陈昊和金亚秋(2010)采用微波辐射异常指数分析发现2010年玉树地震前2天,异常指数的检验区与地震主断层分布有明显的空间相关性。张宾等(2018)提出一种基于四分位数法的地震异常分析方法,研究了勘察加半岛的火山和地震活动,发现 $M_w \geq 6$ 的地震均可检测到微波辐射正异常。作者团队先后提出简单两步法(Ma等,2011)、时空加权两步法STW-TSM(Qi等,2020)来消除地理、地形、季节等稳定性背景影响,以及天气等随机噪声影响;据此提取MBT残差图像,分析揭示了2008年汶川地震、2015年尼泊尔地震序列和2021年玛多地震的MBT正异常现象(Qi等,2021a,2021b,2022)。Ding等(2021)采用STW-TSM研究了2017年两伊边境Sarpol Zahab地震的MBT正异常现象,并利用云量、土壤湿度和降雨等数据排除了非震扰动,识别了地震活动导致的水体和陆地MBT正异常现象。

在遥感多参量异常及其时空相关性方面,Singh等(2010a)分析了2001年印度古吉拉特地震主震前MBT和CO异常,并结合震前地表温度(Ouzounov和Freund,2004)和电离层总电子含量(Trigunai等,2004),发现多参数异常之间具有协同性。同年,Singh等(2010b)还分析了2008年汶川地震多卫星传感器数据(MBT、地表温度、大气温度、相对湿度、水蒸气、臭氧总量、CO和CO₂)和地面观测数据(相对湿度)的相关性与多圈层耦合效应。黄志东等(2014)制作了2013年芦山地震的IBT及MBT时序图,并与可见光及红外云图进行联合分析,讨论了这些异常变化与地球放气的相关性。Jing等(2018)研究了青藏高原1997年玛尼地震和2001年可可西里地震的微波辐射异常指数变化,发现MBT与表层大气温度、CO浓度存在关联。Jing等(2019)还分析了2015年尼泊尔地震Gorkha主震和Dolakha余震前后多个参数(MBT、土壤湿度、地表潜热通量、表层大气温度和CO浓度)的时空变化,认为孕震期地表与大气的多参数变化存在耦合关系。何苗等(2020)基于已有多源数据分析结果,总结梳理了2008年汶川地震前后MBT等多参数异常的时空关联性。吴立新等(2022)基于区域地应力场变化数值模拟分析和孕震区岩石圈—盖层—大气层—电离层(LCAI)耦合范式(Wu等,2012),系统分析了2015年尼泊尔地震序列的MBT正异常现象、揭示

了多圈层多参数异常的时空关联与内在机制。

总之,MBT正异常作为震前地表辐射能量变化的重要现象,在全球范围内具有普遍性,并与其他遥感参量存在时空关联与物理联系。但是,MBT显现的具体特征不仅与发震机制有关,还与孕震区的地质岩性及盖层类型有关,需要结合各类典型案例进行深入研究、仔细甄别和总结梳理。

阿富汗—巴基斯坦地区地处阿拉伯板块、印度洋板块和欧亚板块交界带,受印度洋板块俯冲而南北向~40 mm/a持续挤压欧亚板块的运动作用,不仅导致喜马拉雅山脉和喀喇昆仑山脉持续隆起(Reilinger等,2006),而且使得该地区地震活跃。其中,兴都库什地区地震频发,且近年来地震愈加频繁(Rehman等,2017)。有关该地区地震现象及震前异常的研究逐渐增多,并日益受到关注。例如:Sharma等(2017)研究发现2015年兴都库什7.5级主震前几天,电离层垂直总电子含量呈现显著异常;Nasiry和Aydan(2019)利用随机点源模型,估计了兴都库什地震的地面运动方向。

2022年6月21日20:54:34(UTC)在阿富汗和巴基斯坦边境帕克提卡发生了6.0级地震,震中为33.020°N,69.464°E。针对此次地震,Khac等(2022)利用D-InSAR技术分析了同震形变,发现震中以东大部分地区发生了位移。Kufner等(2022)基于现场调查和InSAR技术,分析发现当地几乎重合的岩石层理与地震断层面很可能促进了地表形变。为探究此次地震前潜在的MBT异常现象及特征规律,本文利用STW-TSM提取MBT残差图像,分析揭示了震前MBT正异常的多态性;并根据孕震区P-hole激活传递理论,结合区域地质岩性与地表覆盖数据进行归因辨析,阐述了地震前后震中东南部印度河平原、西北部沿赫拉特断裂带和临震期高山地区MBT正异常的原因即潜在孕震响应。

2 研究区简介

综合考虑帕克提卡地震的Dobrovolsky孕震范围(Dobrovolsky等,1979)、研究区构造特征与卫星扫描带宽,选择65°E—75°E,26°N—37°N(约130万km²)为研究区(图1)。该区地表盖层类型较为单一,主要由草地、裸地和耕地组成(图1(a))。西部为兴都库什山脉,东北部为喀喇昆仑山脉,地势陡峭,平均海拔超过5500 m,最高海拔约为

8000 m (图1 (b)), 其地表盖层主要为草地和林地; 该区西北部为卡拉库姆沙漠, 西南部为马戈沙漠, 大部分为裸地; 东南部为印度河平原, 地势平坦, 除耕地外还包含部分裸地。区内地质条件复杂, 东南部印度河平原为广阔的第四纪地层, 其余区域由不同时期的地层组成 (图1 (c))。区内气候以热带/亚热带沙漠气候和高山高原气候为

主, 冬季严寒、夏季酷暑, 全年少雨 (Sheikh等, 2009), 云层较少, 适合卫星观测。图1 (b) 还展示了2012年以来该地区6级以上地震分布, 绝大多数发生在东北部的喀喇昆仑山脉, 震源深度均在100 km以上; 而此次地震发生在兴都库什山脉和印度河平原的过渡地带, 震源深度仅为11.5 km (表3), 具有特殊性与典型性。

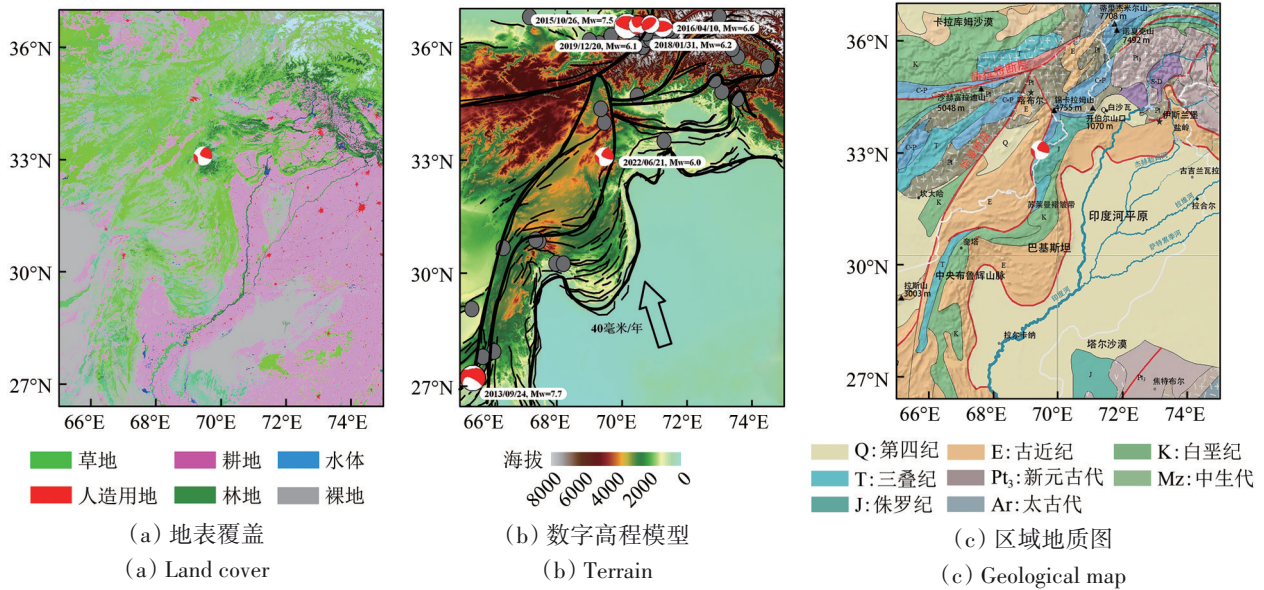


图1 研究区概况

Fig. 1 Basic information of the study area

3 数据与方法

搭载在 GCOM-W1 卫星上的载荷 AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) 是 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) 的继承者, 承担着日本宇航机构 (JAXA)

监测全球环境变化的任务 (Imaoka等, 2012; 胡同喜等, 2016)。AMSR-2 传感器主要包含 10.65—89 GHz 波段 5 种频率的双极化 (水平与垂直) 观测通道, 其主要性能参数见表 1。GCOM-W1 卫星的升、降轨过境时间分别为当地时 1:30 pm 和 1:30 am。

表1 AMSR-2 载荷的主要性能特征

Table 1 Major performance and characteristic of payload AMSR-2

| 观测频段/GHz | 观测极化 | 测量范围/K | 空间分辨率/km | 特征 | | | | |
|----------|-------------------|---------|----------|--------|--------------|---------|---------|---------|
| | | | | NEΔT/K | IFOV/(km×km) | 扫描带宽/km | 入射角/(°) | 天顶距/(°) |
| 10.65 | 水平极化和垂直极化 (H & V) | 2.7—340 | 50 | <0.7 | 42×24 | 1450 | 55.0 | 47.5 |
| 18.7 | | | 25 | <0.7 | 22×14 | | | |
| 23.8 | | | 25 | <0.6 | 19×11 | | | |
| 36.5 | | | 15 | <0.7 | 12×7 | | | |
| 89.0(A) | | | 5 | <1.2 | 5×3 | | | |
| 89.0(B) | 5 | <1.2 | 5×3 | 54.5 | 47.0 | | | |

低频微波辐射具有良好的穿透能力, 一定程度上少受或不受气候的影响 (Ulaby 和 Long, 2015); 而高频微波辐射 (如: 36.5 GHz、89 GHz) 不仅受

高海拔地区的冰雪影响, 而且易受云层影响, 导致 MBT 残差分布碎片化。23.8 GHz 位于水汽吸收峰, 易受大气水汽影响 (Schlüssel 和 Emery, 1990),

也不适合做地震 MBT 研究。载荷 AMSR-2 的低频通道 (10.65 GHz 和 18.7 GHz) 对大气具有较好的穿透性, 均对地表介电变化敏感; 但考虑到 18.7 GHz 的空间分辨率高于 10.65 GHz, 且 Jing 等 (2018) 发现 SSM/I 微波载荷中的 19.35 GHz 对地震异常的灵敏度相对更高, 故本文选用 18.7 GHz 作为主体频段开展研究。数学模拟实验表明, 水平极化的 MBT 比同频垂直极化的 MBT 更适合探测地表介电特性变化 (Qi 等, 2021a)。为避免太阳辐射的影响, 故本文采用 18.7 GHz 水平极化 MBT 的夜间 (当地时间 1:30 am) 降轨数据开展帕克提卡地震亮温变化研究。

此外, 还采用欧洲中期天气预报中心第 5 代再分析数据 (ERA5) 的土壤湿度数据、美国航空航天局 (NASA) 大气红外探测器 (AIRS) 采集到的 CH₄ 和 CO 数据、GPM 卫星观测的降雨数据、航天飞机雷达地形测绘计划 (SRTM) 的数字高程模型 (DEM) 数据集、加拿大地质调查局 (GSC) 的区域地质图以及中国国家基础地理信息中心 (NGCC) 的地表覆盖数据, 对帕克提卡地震前后不同区 MBT 异常现象的机理进行综合研判。辅助数据均采用降轨数据 (当地时间 1:30 am) 用以控制时间的一致性。以上辅助数据的相关信息如表 2 所示。

表 2 辅助数据的基本信息

Table 2 Basic information about auxiliary data

| 遥感参量 | 数据来源 | 空间分辨率 | 时间分辨率 |
|-----------------------|-------|-------------|-------|
| 土壤湿度 (SM) | ERA-5 | 0.25°×0.25° | 1 h |
| 一氧化碳 (CO) | AIRS | 1°×1° | 0.5 d |
| 甲烷 (CH ₄) | AIRS | 1°×1° | 0.5 d |
| 降雨 | GPM | 0.05°×0.05° | 1 d |
| 数字高程模型 | SRTM | 90 m | — |
| 区域地质图 | GSC | 9200 m | — |
| 地表覆盖 | NGCC | 30 m | — |

采用 STW-TSM 提取地震年 MBT 残差图像。该法首先根据历史年与地震年的时间差给历史年观测数据赋权, 得到时间加权背景场, 去除地形、地势等长期稳定性影响, 公式如下:

$$T_{\omega}(x, y, t_{\xi}) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\exp \left(-\frac{(\varphi_i - \xi)^2}{D_1^2} \right) \cdot T(x, y, t_i) \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\exp \left(-\frac{(\varphi_i - \xi)^2}{D_1^2} \right) \right)} \quad (1)$$

$$\Delta T(x, y, t_{\xi}) = T(x, y, t_{\xi}) - T_{\omega}(x, y, t_{\xi}) \quad (2)$$

式中, i 为非震年的序号, n 为研究区间的总年数, φ_i 为某一地震年, ξ 代表地震年, D_1 是地震年和所有非震年的最大年间隔, t_{ξ} 是地震年的任意一天而 t_i 是非震年的同一天, $T(x, y, t_i)$ 和 $T(x, y, t_{\xi})$ 代表像素 (x, y) 分别为 t_i 天和 t_{ξ} 天的 MBT 观测值, $T_{\omega}(x, y, t_{\xi})$ 是由所有 $T(x, y, t_i)$ 经过计算得到的加权参考值, $\Delta T(x, y, t_{\xi})$ 是像素 (x, y) 在 t_{ξ} 天的残差值;

然后根据区内像素点与边缘点的欧氏距离, 加权计算区内气象扰动分布, 去除天气等短期随机因素干扰, 公式如下:

$$T_m(x, y, t_{\xi}) = \frac{\sum_{k=1}^p \left(\exp \left(-\frac{(i_k - x)^2 + (j_k - y)^2}{D_2^2} \right) \cdot T(i_k, j_k, t_{\xi}) \right)}{\sum_{k=1}^p \left(\exp \left(-\frac{(i_k - x)^2 + (j_k - y)^2}{D_2^2} \right) \right)} \quad (3)$$

$$\Delta \Delta T(x, y, t_{\xi}) = \Delta T(x, y, t_{\xi}) - T_m(x, y, t_{\xi}) \quad (4)$$

式中, k 为研究区边缘任意像素的序列号, p 为远处总像素个数, (i_k, j_k) 是远场的任意像素坐标, D_2 为研究区域的斜向长度, $T_m(x, y, t_{\xi})$ 为地震年远处像素的内插值, $\Delta \Delta T(x, y, t_{\xi})$ 为最终的残差值。由此两步, 得到可能与地震相关的 MBT 残差值 (Qi 等, 2020)。为避免强震对 MBT 背景场的扰动, 建立历史 MBT 背景场时需要删除区内强震 ($M_w \geq 6$) 前、后一个月的 MBT 数据。考虑到历史背景场数据存在部分缺失, 采用滑动窗口方法, 将缺失日前后 14 天的数据平均值填充缺失像素。同理, 使用 STW-TSM 的第一步可去除地形、高程等对 SM 的稳定性影响, 得到 SM 残差值, 由此反应降雨等气象条件带来的非震扰动。区内近 10 年、6 级以上地震信息及发震位置如表 3 及图 1 (b) 所示。

表 3 研究区 2012 年—2022 年历史地震 ($M_w \geq 6$) (来源于 USGS)

Table 3 Historical earthquakes ($M_w \geq 6$) from 2012 to 2022 in the study area (From USGS)

| 地点 | 时间 (UTC) | 震级 (M_w) | 震源深度 / km |
|------|------------|--------------|-----------|
| 贝拉 | 2013-09-24 | 7.7 | 15.0 |
| 兴都库什 | 2015-10-26 | 7.5 | 231.0 |
| 巴达赫尚 | 2016-04-10 | 6.6 | 212.0 |
| 朱尔姆 | 2018-01-31 | 6.2 | 193.7 |
| 朱尔姆 | 2019-06-21 | 6.1 | 212.0 |
| 帕克提卡 | 2022-06-21 | 6.0 | 11.5 |

4 MBT正异常现象及归因分析

4.1 MBT正异常的时序特征

图2为18.7 GHz水平极化MBT残差与同日SM

残差、总降雨量影像的对比。可见,震前1个月内,MBT正异常频繁显现在东南部印度河平原;震前1天,西北部沿赫拉特断层区和卡拉库姆沙漠也显现了斑块状MBT正异常。

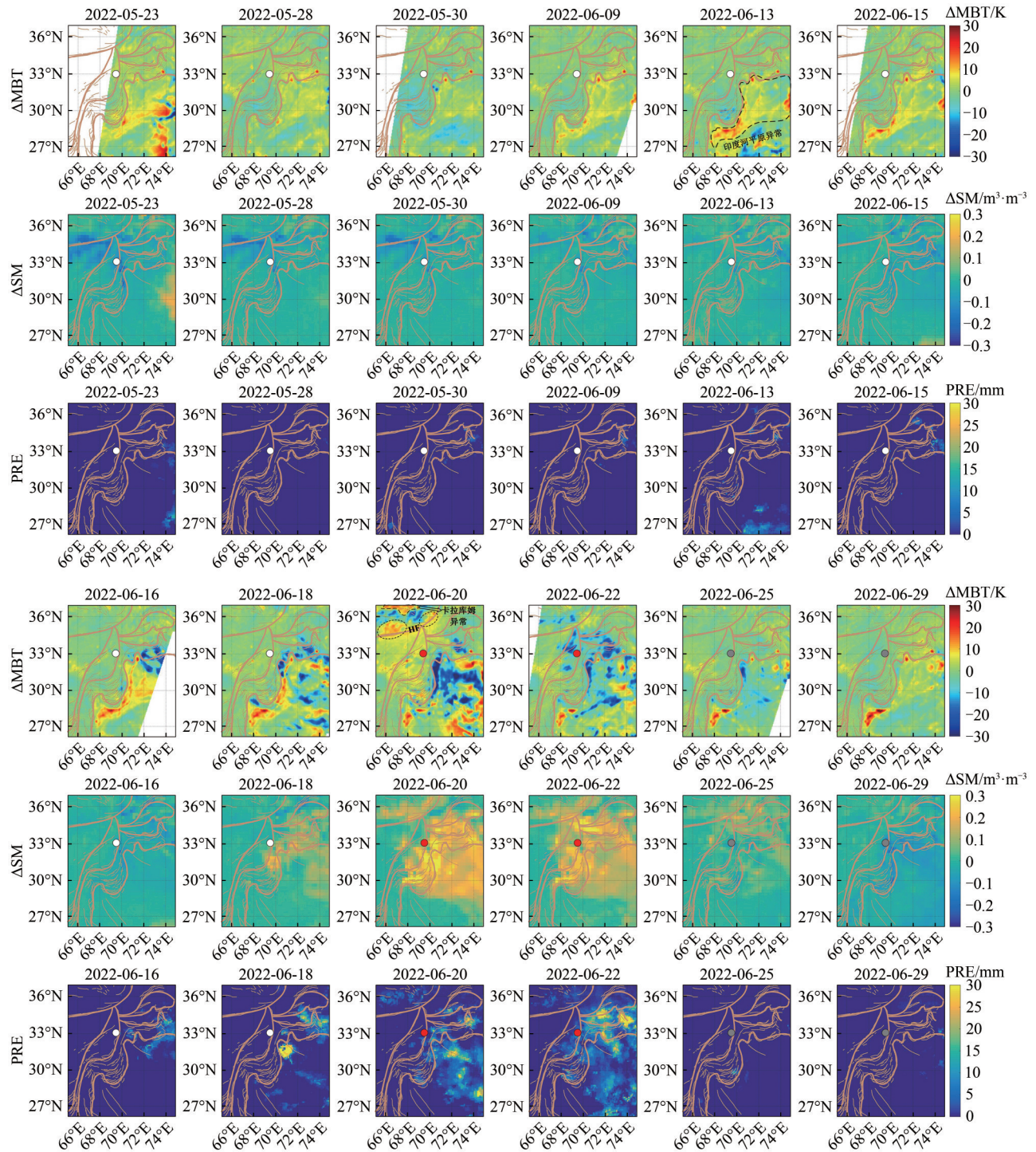


图2 18.7 GHz的MBT残差值(Δ MBT)、SM残差(Δ SM)和降雨量(PRE)影像对照。圆点表示震中位置,白色、灰色和白色分别代表震前、发震和震后日期,HF:赫拉特断层

Fig. 2 Contrast of 18.7 GHz MBT residuals to SM residuals and precipitation images; the circle dots mark the epicenter, with white, red, and gray color for the days before shock, shocking, and after shock, respectively. HF: Herat Fault

其时间过程如下:

(1) 印度河平原地区: 震前29天, 东南部印度河平原地区率先显现MBT正异常(5月23日); 之后分别在震前24天(5月28日)、震前22天(5月30日)、震前12天(6月9日)、震前8天(6月13日)、震前6天(6月15日)间断显现, 震前5天(6月16日)正异常显著增强; 震前3天(6月18日)至震后1天(6月22日)显现正、负异常混合现象; 之后, 正异常逐渐减弱, 震后8天(6月29日)消失。

(2) 赫拉特断层区和卡拉库姆沙漠: 震前1天(6月20日)西北部沿赫拉特断层区和卡拉库姆沙漠同时显现MBT正异常。

4.2 东南部印度河平原MBT正异常

自5月23日开始, 东南部印度河平原不时显现MBT正异常; 且显现的频率和幅度随地震临近逐渐增加(图2)。以6月18日至20日为例, 东南部印度河平原显现了MBT正、负异常混合现象。通过对比同期SM残差值和降雨影像可知, 印度河平原有大面积、大幅值的降雨, 导致此地区土壤湿度明显升高。低频MBT虽对大气和植被具有较好的穿透性, 但易受土壤湿度影响(Wigner等, 1995; Calvet等, 2011)。土壤湿度升高增大了地表介电常数, 从而导致MBT负异常; 但部分SM残差值较低的地区, MBT仍表现为高值正异常, 最大值约20 K。由此推测: 震前3天至震后1天, 虽然降雨改变了印度河平原的土壤湿度, 并部分抵消或掩盖了MBT正异常, 但未被掩盖区仍显现较强的正异常。由于震前降雨, 印度河平原显现MBT正、负异常混合现象, 但正异常区与第四纪

地层、耕地具有空间一致性。

地应力场变化和临震期岩石破裂发育是地震异常信号显现的本质原因(吴立新等, 2018)。地壳岩石尤其是变质岩、砂岩广泛存在应力敏感的过氧缺陷; 过氧缺陷被孕震应力激活后形成P-hole电流(Freund, 2000, 2011), 并沿着应力梯度向上迁移, 最终在低应力区的岩石表面积聚。地表P-hole集聚导致地表岩石或其上方沙土层产生附加电场, 降低浅层介质的介电常数, 进而提高地表微波发射率和微波辐射。岩石受压微波辐射及介电变化实验也表明, 岩石在压缩加载过程中, 其表面微波介电常数显著降低(毛文飞, 2019)。第四纪地层岩性疏松, 砾石、沙性颗粒中包含变质岩碎屑(曹伯勋, 1995), 其不仅是深部孕震区P-hole向地表传播的媒介, 也是浅层受力时的P-hole源区。

印度河平原地处印度洋板块南北向挤压亚欧板块的过渡带, 受喀喇昆仑山脉阻挡而常受到地应力挤压作用, 为震前P-hole生成形成了客观条件。本文结合已有地质资料(断层走向、Crust1.0全球三维地壳数据), 顾及GNSS速度场, 利用ANSYS有限元计算并分析了研究区内主要断层面上的应力演化(图6)。结果显示, 前沿断层处于高应力集中区, 形成最值为200—300 MPa, 与图3的印度河平原正异常有较好空间对应关系。此外, 印度河平原为地势平缓的耕地与裸地, 土质为松软沙土(图3(c))。实验证明, 沙土可对MBT正异常产生放大作用(Mao等, 2020)。故该地区在孕震期频繁显现MBT正异常现象是有其地质岩性与土壤属性客观条件的。

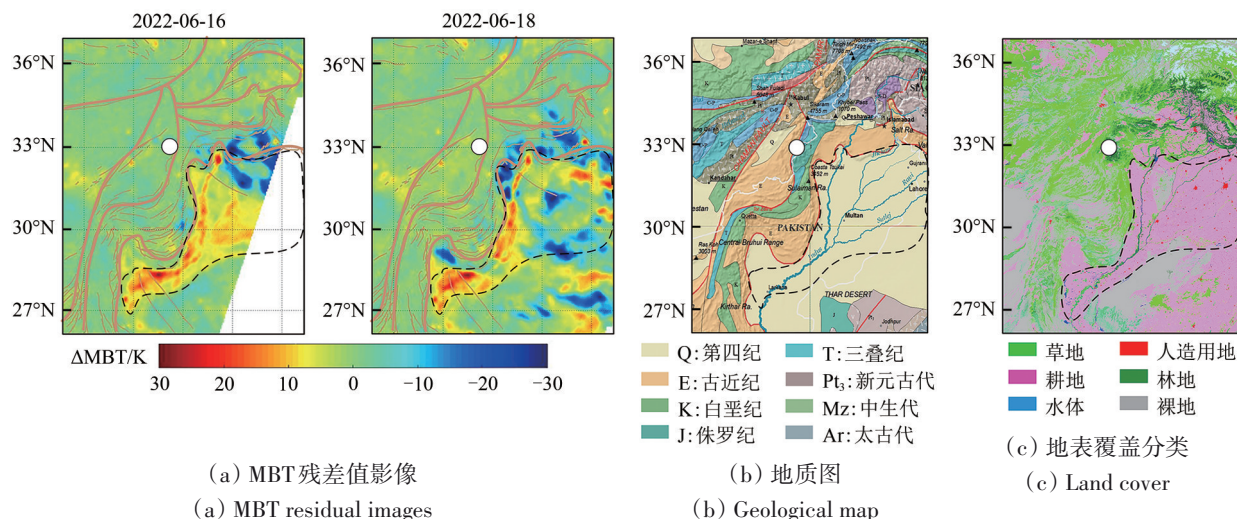


图3 研究区东南部大范围MBT正异常区的对照图

Fig. 3 Contrast of large area of MBT positive anomaly in the southeast of study area

此外，在印度河平原异常的西南部，也时有MBT正异常显现。GNSS观测数据和文献表明，该地区的长时段形变量十分显著，表现出较强的复杂性应力变化（Khan等，2008；Reynolds等，2015）。

根据震源机制解和该处断层的高倾角特征，Hinsch等（2018）曾通过数值模拟推测此处地壳处于不断拆离过程，印证了此处应力挤压—松弛的相互变化过程，导致MBT不时显现正异常。

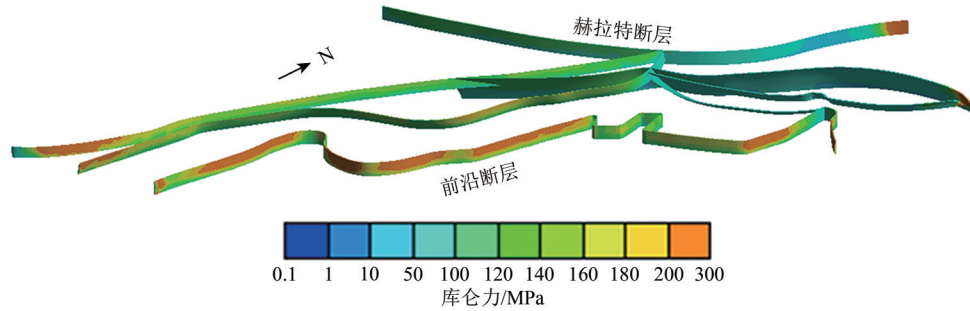


图4 断层构造应力演化
Fig. 4 Tectonic stress evolution of fault plane

4.3 西北部MBT正异常

震前1天，研究区西北部显现了两处MBT正异常，一是沿赫拉特断层（图5（a）中椭圆所示区），一是位于西北部的卡拉库姆沙漠（图5（a）中不规则图形所示区）。对比同时期的CH₄和CO数据，沿赫拉特断层显现的MBT正异常与上述两种温室气体的浓度聚集区存在空间相关性（图5（b）、图5（c））。该区为前寒武纪煤矿点和白垩纪煤矿点的聚集区（Wnuk，2016），煤系地层中的CH₄、CO等温室气体易受地震活动扰动而沿断层或矿井逸出，而该区的CH₄和CO浓度在震前的确显现了

聚集性上升现象（图5（b）、5（c）），模拟结果也显示赫拉特断层处于低应力区（图4）。由此推测：临震期间孕震区局部应力场的改变使得赫拉特断层的裂缝伸张，地下大量CH₄和部分CO气体逸出，形成温室效应，导致局地MBT上升。卡拉库姆沙漠的MBT正异常则位于第四系与裸地的交集处（图3（b）、3（c）），推测其原理与东南部印度河平原MBT频繁显现正异常的原理类似：由地应力激活的P-hole沿应力梯度传递到第四系地层，降低了近地表介质的介电常数，并由盖层沙土进一步放大微波辐射，最终导致MBT正异常。

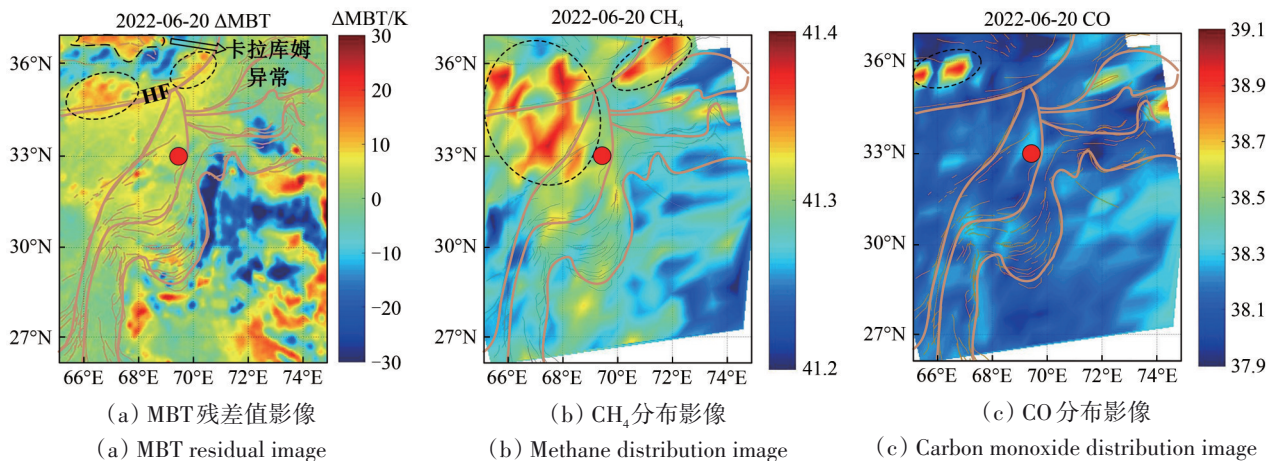


图5 2022年6月20日沿赫拉特断层MBT正异常的对照图
Fig. 5 Contrast of positive MBT anomaly along the Herat Fault on June 20, 2022

4.4 高山区MBT正异常

临震期在喀拉昆仑山脉和兴都库什山脉交接

的高山区显现了大面积、大幅度的MBT正异常；降轨影像在震前1天显现，升轨影像在震前2天显

现。联合对应时刻的SM残差和逐日总降雨影像可知,此时并无土壤湿度和降雨影响(图6)。对比图1(c)和图6可知,MBT正异常显现在高海拔的古近纪地层区,此地区的古近纪岩层为厚砂页岩夹层(Jadoon和Akbar,1996),由砂岩、灰岩等沉积岩组成;而砂岩对P-hole的传递具有促进作用,有利于P-hole的聚集(Qi等,2021b)。随着印度洋块体持续向北挤压阿富汗块体(Khan等,

2008),导致印度洋块体和阿富汗块体之间的断层呈现左旋走滑和压应力特征(Kufner等,2022),孕震区所在的兴都库什山脉和喀喇昆仑山脉是主要的高应力集中区。临震期激活的大量P-hole沿应力梯度向上扩散,传递到富含砂岩的喀喇昆仑山脉和兴都库什山脉的地表,使得该地区地表的介电常数降低,最终导致临震前MBT升高。

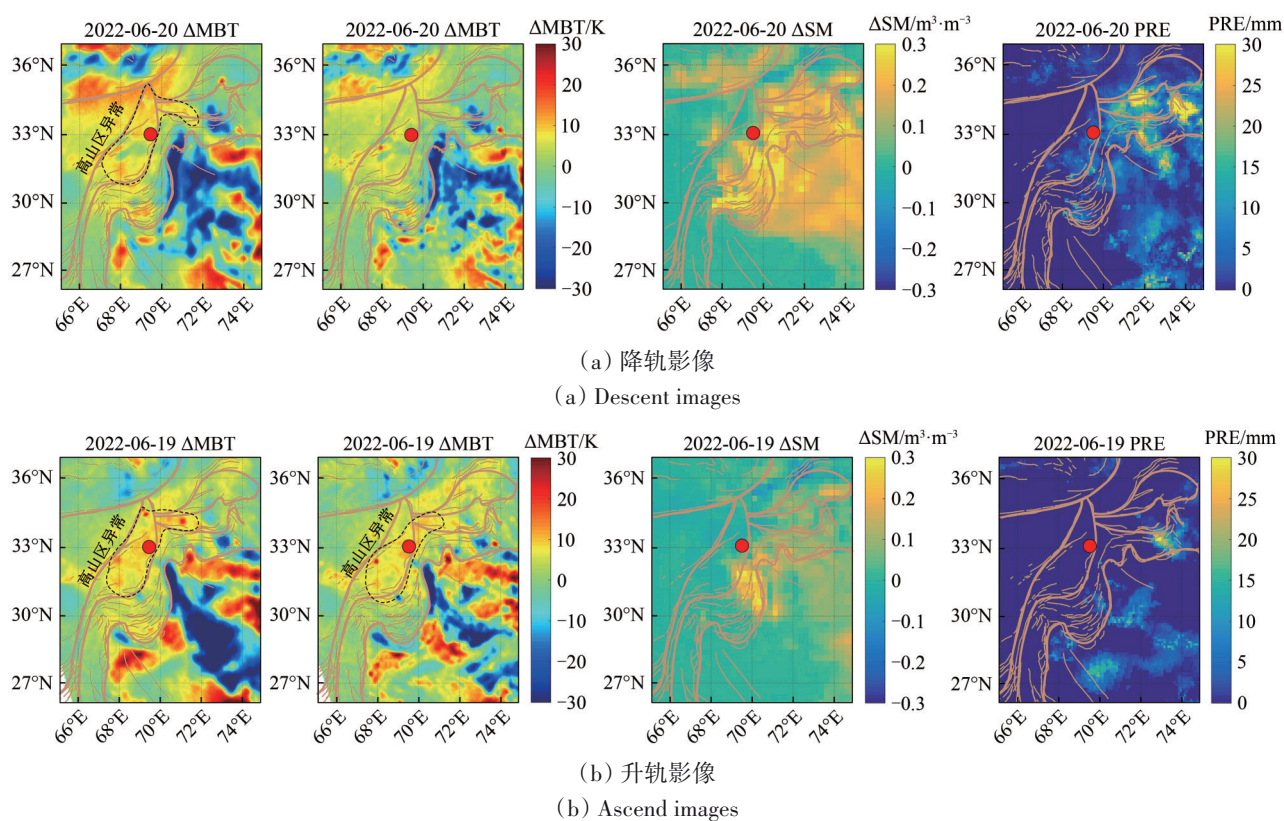


图6 临震期高山地区MBT异常(10.65 GHz、18.7 GHz)与土壤湿度残差、降雨图像的对比

Fig. 6 Contrast of the MBT anomalies to SM residuals and precipitation images in high mountain area appeared before shaking

5 结论

本文利用GCOM-W1卫星的AMSR-2观测数据,提取了2022年6月21日阿富汗帕克提卡地震前后的MBT残差图像、分析了其时空演变特征;并结合孕震区地理、地质、气象条件及遥感物理机制,辨析了震前MBT正异常的成因。研究揭示:孕震区东南部印度河平原的MBT正异常和西北部卡拉库姆沙漠的MBT正异常是应力激活的P-hole传递到第四系地层,降低地表介电常数所致;西北部沿赫拉特断层的MBT正异常与震前断层拉张有关,受到煤系地层CH₄、CO逸出所致温室效应的贡献;临震期高山区MBT正异常,由应力激活的

P-hole聚集在高山砂岩地表,从而降低介电常数所致。综上所述:MBT正异常受区域板块构造活动、孕震区地质岩性和地表盖层类型等多种因素影响,孕震期的MBT异常显现在多态性,需要利用多源信息和多参数仔细甄别与遥感物理解析。

因气体易受气象条件与大气输送等其他因素干扰,难以建立纯净背景场来提取CH₄和CO的残差图像;目前仅利用观测值图像的空间相对变化进行异常识别,后续还有待改进。建立该孕震区的三维精细地层模型,结合GNSS速度场开展三维有限元数值模拟非常必要,这将有利于分析孕震过程中应力场的三维时空变化,及其与多参数异常、多圈层耦合效应的联系,并加强兴都库什地

区地震频发原因和遥感异常机理的科学理解。此外,我们将继续寻找更多遥感数据(如气温垂直分层、温室气体垂直分层等)和相关数据资料,验证沿赫拉特断层MBT正异常归因分析的可靠性;位于高山—平原过渡地带的印度河河道震前出现了MBT正、负异常断续交错的特殊复杂现象,其成因也有待后续研究。最后,本文只开展了有震区的MBT异常研究,并未对比无震区和有震区在长时间范围内的异常多态性特征,今后将进行长时空范围的MBT等多参数异常特征研究。

志 谢 感谢日本宇宙航空研究开发机构提供的MBT数据、美国宇航局提供的DEM、土壤湿度、降雨以及气体数据,欧洲天气预报中心提供的卫星云图数据,加拿大地质调查局提供的地质图,以及国家基础地理信息中心提供的地表覆盖数据。

参考文献(References)

- Calvet J C, Wigneron J P, Walker J, Karbou F, Chanzy A and Albergel C. 2011. Sensitivity of passive microwave observations to soil moisture and vegetation water content: L-band to W-band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4): 1190-1199 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2050488]
- Cao B. 1995. *Geomorphology Quaternary Geology*. Wuhan: China University of Geosciences Press (曹伯勋. 1995. 地貌学及第四纪地质学. 武汉: 中国地质大学出版社)
- Chen H and Jin Y Q. 2010. A preliminary detection of anomalous radiation of rock failures related with yushu earthquake by using satellite-borne microwave radiometers. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(6): 860-866 (陈昊, 金亚秋. 2010. 星载微波辐射计对玉树地震岩石破裂辐射异常的初步检测. *遥感技术与应用*, 25(6): 860-866) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2010.6.860]
- Ding Y F, Qi Y, Wu L X, Mao W F and Liu Y J. 2021. Discriminating the multi-frequency microwave brightness temperature anomalies relating to 2017 Mw 7.3 sarpol zahab (Iran-Iraq Border) earthquake. *Frontiers in Earth Science*, 9: 656216 [DOI: 10.3389/feart.2021.656216]
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I and Miachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure and Applied Geophysics*, 117(5): 1025-1044 [DOI: 10.1007/BF00876083]
- Freund F. 2000. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B5): 11001-11019 [DOI: 10.1029/1999JB900423]
- Freund F. 2011. Pre-earthquake signals: underlying physical processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4/5): 383-400 [DOI: 10.1016/j.jseas.2010.03.009]
- Gorny V I, Salman A G, Tronin A A and Shilin B V. 1988. Outgoing infrared radiation of the earth as an indicator of seismic activity. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 303(1): 67-69
- He M, Wu L X, Cui J, Wang W, Qi Y, Mao W F, Miao Z L, Chen B Y and Shen X H. 2020. Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(6): 681-700 (何苗, 吴立新, 崔静, 王威, 齐源, 毛文飞, 苗则朗, 陈必焰, 申旭辉. 2020. 汶川地震前多圈层短-临遥感异常回顾及其时空关联性. *遥感学报*, 24(6): 681-700) [DOI: 10.11834/jrs.20200059]
- Hu T X, Zhao T J, Shi J C and Gu J Z. 2016. Inter-calibration of AMSR-E and AMSR2 brightness temperature. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(5): 919-924 (胡同喜, 赵天杰, 施建成, 谷金枝. 2016. AMSR-E与AMSR2被动微波亮温数据交叉定标. *遥感技术与应用*, 31(5): 919-924) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.0919]
- Huang Z D, Zhong R X and Zhu A J. 2014. FY-3 satellite monitoring of the thermal abnormality before and after 2013 Ms 7.0 Lushan earthquake. *North China Earthquake Sciences*, 32(3): 19-23, 34 (黄志东, 钟儒祥, 朱爱军. 2014. FY-3卫星监测四川芦山地震前后热异常. *华北地震科学*, 32(3): 19-23, 34) [DOI: 10.3969/j.jssn.1003-1375.2014.03.005]
- Imaoka K, Maeda T, Kachi M, Kasahara M, Ito N and Nakagawa K. 2012. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1//Proceedings Volume 8528, *Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II*. Kyoto: SPIE: 201-206 [DOI: 10.1117/12.977774]
- Jadoon I A K and Khurshid A. 1996. Gravity and tectonic model across the Sulaiman fold belt and the Chaman fault zone in western Pakistan and eastern Afghanistan. *Tectonophysics*, 254(1/2): 89-109 [DOI: 10.1016/0040-1951(95)00078-X]
- Jing F, Singh R P and Shen X H. 2019. Land-atmosphere-meteorological coupling associated with the 2015 Gorkha (M 7.8) and Dolakha (M 7.3) Nepal earthquakes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 1267-1284 [DOI: 10.1080/19475705.2019.1573629]
- Jing F, Singh R P, Sun K and Shen X H. 2018. Passive microwave response associated with two main earthquakes in Tibetan Plateau, China. *Advances in Space Research*, 62(7): 1675-1689 [DOI: 10.1016/j.asr.2018.06.030]
- Khac D V, Trong T P and Tapponnier P. 2022. Short communication: surface ruptures and land deformation from the 21 June 2022 Afghanistan earthquake. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 44(3): 447-450 [DOI: 10.15625/2615-9783/17258]
- Khan M A, Bendick R, Bhat M I, Bilham R, Kakar D M, Khan S F, Lodi S H, Qazi M S, Singh B, Szeliga W and Wahab A. 2008. Preliminary geodetic constraints on plate boundary deformation on the western edge of the Indian plate from TriGGnet (Tri-University GPS Geodesy Network). *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 41: 71-87

- Kufner S K, Bie L, Gao Y, Lindner M, Waizy H, Kakar N and Reitbrock A. 2022. The devastating 2022 M6.2 Afghanistan earthquake: challenges, processes and implications. *Research Square*, 50(11) [DOI: 10.21203/rs.3.rs-2238516/v1]
- Ma Y T, Liu S J, Wu L X and Xu Z Y. 2011. Two-step method to extract seismic microwave radiation anomaly: case study of M_s 8.0 Wenchuan earthquake. *Earthquake Science*, 24(6): 577-582 [DOI: 10.1007/s11589-011-0819-x]
- Maeda T and Takano T. 2009. Detection of microwave signals associated with rock failures in an earthquake from satellite-borne microwave radiometer data//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE: III-61-III-64 [DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5418159]
- Maeda T and Takano T. 2010. Detection algorithm of earthquake-related rock failures from satellite-borne microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4): 1768-1776 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2036008]
- Mao W F. 2019. Pressure Effects on the Microwave Radiation and Dielectric Property of Rocks: Experiments and Mechanisms. *Shenyang: Northeastern University* (毛文飞. 2019. 岩石受压微波辐射及介电变化的实验观测与机理分析. 沈阳: 东北大学)
- Mao W F, Wu L X, Liu S J, Gao X, Huang J W, Xu Z Y and Qi Y. 2020. Additional microwave radiation from experimentally loaded granite covered with sand layers: features and mechanisms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7): 5008-5022 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2971465]
- Nasiry N Z and Aydan Ö. 2019. Ground motion estimation at Kabul City for Mw 7.5 Hindu Kush earthquake//ISRM Rock Dynamics Summit. Okinawa: [s.n.] 250-255
- Ouzounov D and Freund F. 2004. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Advances in Space Research*, 33(3): 268-273 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00486-1]
- Qi Y, Wu L X, He M and Mao W F. 2020. Spatio-temporally weighted two-step method for retrieving seismic MBT anomaly: May 2008 Wenchuan earthquake sequence being a case. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 382-391 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2962719]
- Qi Y, Wu L X, Ding Y F, Liu Y J, Chen S, Wang X and Mao W F. 2021a. Extraction and discrimination of MBT anomalies possibly associated with the Mw 7.3 Maduo (Qinghai, China) Earthquake on 21 May 2021. *Remote Sensing*, 13(22): 4726 [DOI: 10.3390/rs13224726]
- Qi Y, Wu L X, Ding Y F and Mao W F. 2022. Microwave brightness temperature anomalies associated with the 2015 Mw 7.8 Gorkha and Mw 7.3 Dolakha Earthquakes in Nepal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4500611 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3036079]
- Qi Y, Wu L X, Mao W F, Ding Y F and He M. 2021b. Discriminating possible causes of microwave brightness temperature positive anomalies related with May 2008 Wenchuan earthquake sequence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(3): 1903-1916 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3004404]
- Rehman K, Ali W, Ali A, Ali A and Barkat A. 2017. Shallow and intermediate depth earthquakes in the Hindu Kush region across the Afghan-Pakistan border. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148: 241-253 [DOI: 10.1016/j.jseae.2017.09.005]
- Reilinger R, McClusky S, Vernant P, Lawrence S, Ergintav S, Cakmak R, Ozener H, Kadirov F, Guliev I, Stepanyan R, Nadariya M, Hahubia G, Mahmoud S, Sakr K, ArRajehi A, Paradissis D, Al-Aydrus A, Prilepin M, Guseva T, Evren E, Dmitrova S, Filikov S V, Gomez F, Al-Ghazzi R and Karam G. 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5): B05411 [DOI: 10.1029/2005JB004051]
- Reynolds K, Copley A and Hussain E. 2015. Evolution and dynamics of a fold-thrust belt: the Sulaiman Range of Pakistan. *Geophysical Journal International*, 201(2): 683-710 [DOI: 10.1093/gji/ggv005]
- Schluessel P and Emery W J. 1990. Atmospheric water vapour over oceans from SSM/I measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 11(5): 753-766 [DOI: 10.1080/01431169008955055]
- Sharma G, Champati Ray P K, Mohanty S, Gautam P K R and Kanaujia S. 2017. Global navigation satellite system detection of preseismic ionospheric total electron content anomalies for strong magnitude ($M_w > 6$) Himalayan earthquakes. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4): 046018 [DOI: 10.1117/1.JRS.11.046018]
- Sheikh M M, Manzoor N, Adnan M, Ashraf J and Khan A M. 2009. Climate Profile and Past Climate Changes in Pakistan. Islamabad: Global Change Impact Studies Centre
- Singh R P, Kumar J S, Zlotnicki J and Kafatos M. 2010a. Satellite detection of carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001. *Applied Geochemistry*, 25(4): 580-585 [DOI: 10.1016/j.apgeochem.2010.01.014]
- Singh R P, Mehdi W, Gautam R, Kumar J S, Zlotnicki J and Kafatos M. 2010b. Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008. *International Journal of Remote Sensing*, 31(13): 3341-3354 [DOI: 10.1080/01431161.2010.487503]
- Trigunait A, Pulinet S, Li F. 2004. Variation of the ionospheric electron density during the Bhajseismic event. *Annales Geophysicae*, 22, 4123-4131. DOI: 10.5194/angeo-22-4123-2004
- Ulaby F T and Long D G. 2015. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. Fitchburg: Artech House
- Wigneron J P, Chanzy A, Calvet J C and Bruguier N. 1995. A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. *Remote Sensing of Environment*, 51(3): 331-341 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)00081-W]
- Wnuk C. 2016. Coal resource potential of Afghanistan. *International Geology Review*, 58(3): 321-341 [DOI: 10.1080/00206814.2015.1071209]

Wu L X, Lu J C, Mao W F, Hu J, Zhou Z L, Li Z W, Qi Y and Yao R B. 2022. Sectional fault-inclination-change based numerical simulation of tectonic stress evolution on the seismogenic fault of Madoi earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10): 3844-3857 (吴立新, 卢菁琛, 毛文飞, 胡俊, 周子龙, 李志伟, 齐源, 姚汝冰. 2022. 基于断层倾角分段变化的玛多地震震断层构造应力场演化数值模拟分析. *地球物理学报*, 65(10): 3844-3857) [DOI: 10.6038/cjg2022P0988]

Wu L X, Mao W F, Liu S J, Xu Z Y, Li Z W, Qi Y and Miao Z L. 2018. Mechanisms of altering infrared-microwave radiation from stressed rock and key issues on crust stress remote sensing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(S1): 146-161 (吴立新, 毛

文飞, 刘善军, 徐忠印, 李志伟, 齐源, 苗则朗. 2018. 岩石受力红与微波辐射变化机理及地应力遥感关键问题. *遥感学报*, 22(S1): 146-161 [DOI: 10.11834/jrs.20187256]

Wu L X, Qin K and Liu S J. 2012. GEOS-2 based thermal parameters analysis for earthquake anomaly recognition. *Proceedings of the IEEE*, 100(10): 2891-2907 [DOI: 10.1109/JPROC.2012.2184789]

Zhang B, Qin K, Wu T, Shi T W and Fan W Z. 2018. Statistical analysis of microwave radiation anomaly before earthquake: a case study of Kamchatka Peninsula. *Acta Seismologica Sinica*, 40(1): 98-107 (张宾, 秦凯, 吴涛, 石铁伟, 樊文智. 2018. 地震前卫星遥感微波辐射异常统计分析: 以堪察加半岛为例. *地震学报*, 40(1): 98-107) [DOI: 10.11939/jass.20170089]

Discriminating the polymorphism and attribution of microwave radiation anomalies related to the June 2022 Mw 6.0 Paktita earthquake in Afghanistan

DING Yifan, WU Lixin, QI Yuan, MAO Wenfei

1. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Laboratory of Geo-Hazards Perception, Cognition and Predication, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The Arabian plate continues to squeeze the Eurasian plate northward, which promotes stress field changes, local stress locking, and rupture instability. This phenomenon resulted in the magnitude 6.0 shallow earthquake on June 21, 2022 in Paktita province on the Afghanistan-Pakistan border, which is the largest earthquake in the region in the past 10 years. Studying the phenomenon and mechanism of earthquakes is crucial. By analyzing an earthquake case with multisource data, the eternal earth science topic of earthquake perception and cognition is studied deeply. In this study, the Microwave Brightness Temperature (MBT) data collected by the AMSR-2 radiometer of the Aqua satellite was used to extract pre-earthquake and postearthquake MBT residuals within more than a million square kilometers around the epicenter by using a spatiotemporally weighted two-step method, revealing the spatiotemporal evolution characteristics of MBT and the polymorphism of positive MBT anomalies. On the basis of the data of precipitation, soil moisture, regional geological map, land cover, and greenhouse gases, such as CH₄ and CO, the attribution analysis of positive polymorphic MBT anomalies was discriminated one by one. We found that (1) the positive MBT anomaly in the Indus Plain, southeast of the epicenter, and the positive MBT anomaly in the Karakum desert, northwest of the epicenter, could be attributed to the cavity particles (P-hole) activated by the seismogenic stress, transferring from the seismogenic area to the Quaternary overburden along the stress gradient, which reduces the dielectric constant of the dielectric constant in shallow surface layer; (2) the positive MBT anomaly in the alpine area during the earthquake period could be attributed to the transfer and accumulation of stress-activated P-hole to the alpine low-temperature area, which resulted in the decrease in the microwave dielectric constant of the sandy layer; (3) the positive MBT anomaly along the Herat Fault, northwest of the epicenter, was related to the fault stretching during the imminent earthquake and might have been affected by the greenhouse effect caused by the degassing of coal-bearing formations along fault and coal mines. In this study, the temporal and spatial evolution of the MBT of the Paktika earthquake was analyzed. Results showed that the MBT positive anomalies was affected by many factors, such as regional plate structure activity, geological lithology, and surface land cover. The MBT anomaly in seismogenic stage was polymorphic and must be carefully screened using multisource information and multiparameters. This study is crucial for observing and identifying the seismic anomaly in West Asia and has reference value for seismic remote sensing monitoring and anomaly recognition in other parts of the world.

Key words: remote sensing, microwave brightness temperature, Seismic anomaly, P-hole, microwave dielectric, greenhouse effect, crustal stress field alteration

Supported by National natural Science Foundation of China (No. 41930108); National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC15035); the Special Project of Strategic Science and Technology Innovation Cooperation (No. 2023YFE0208000); the Central South University Graduate Student Independent Exploration and Innovation Project (No. 2023ZZTS0440)