

基于FY-3E卫星的山东德州 M_S 5.5地震OLR异常研究

马未宇, 姬伟, 余丹, 李建勇, 邵银星, 刘军

OLR anomalies of the Dezhou M_S 5.5 earthquake in Shandong Province based on FY-3E satellite data

Ma Weiyu, Ji Wei, Yu Dan, Li Jianyong, Shao Yinxing, and Liu Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平原 M_S 5.5地震与流动重磁应急观测分析

The Pingyuan M_S 5.5 earthquake and emergency observation and analysis of the mobile gravity and magnetism

地震科学进展. 2025, 55(3): 135–142

地球物理探测卫星数据分析处理技术与地震预测应用研究项目及研究进展

Project plan and research on data analysis and processing technology of geophysical exploration satellite and application research of earthquake prediction

地震科学进展. 2022, 52(1): 1–25

基于北斗卫星的地震应急现场通信系统应用研究设想

Assumption of application research of field communication system for seismic emergency based on BeiDou Navigation Satellite System

地震科学进展. 2020, 50(11): 1–7

剑河 M_S 5.5地震前地磁异常特征分析

Analysis of geomagnetic anomalies before the Jianhe M_S 5.5 earthquake

地震科学进展. 2020, 50(5): 12–17

2022年2—3月中国大陆地区 $M_S \geq 4.0$ 地震震源机制解测定

Determination of the focal mechanism solutions of the earthquakes with $M_S \geq 4.0$ occurred in the mainland of China during February to March 2022

地震科学进展. 2022, 52(4): 183–189

多参量联合分析的地震空间探测异常研究进展

Research progress of seismic remote sensing anomalies based on multi-parameter combined analysis

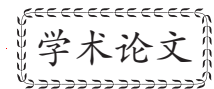
地震科学进展. 2022, 52(6): 241–250



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马未宇, 姬伟, 余丹, 等. 基于 FY-3E 卫星的山东德州 $M_S5.5$ 地震 OLR 异常研究 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(11): 609-618. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-065

Ma W Y, Ji W, Yu D, et al. OLR anomalies of the Dezhou $M_S5.5$ earthquake in Shandong Province based on FY-3E satellite data[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(11): 609-618. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-065



基于 FY-3E 卫星的山东德州 $M_S5.5$ 地震 OLR 异常研究

马未宇^{1)*} 姬伟²⁾ 余丹¹⁾ 李建勇¹⁾ 邵银星¹⁾ 刘军³⁾

1) 中国地震台网中心, 北京 100045

2) 中科星图维天信科技股份有限公司, 北京 100101

3) 防灾科技学院, 河北三河 065201

摘要 依据天体引潮力变化周期, 利用 FY-3E 卫星射出长波辐射 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) 数据, 分析了中国大陆大范围 ($17^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E}\sim 136^{\circ}\text{E}$) 内 2023 年 6 月 30 日—8 月 30 日 OLR 逐日连续变化特征, 探讨了引潮力、OLR 和 2023 年 8 月 6 日德州平原县发生 5.5 级地震的关联特征。依据引潮力变化周期同步监测 OLR 变化图像显示: ① 无震引潮力变化 (震前 A 和 B、震后 D) 周期, 震中附近 OLR 无明显变化; 而发震周期 (C 周期) 同步观测到连续的 OLR 异常, 且伴随引潮力由低谷—高峰—低谷的持续变化, OLR 异常在时间上呈现出初始增温—加强—高峰—衰减—逐渐平静的阶段性特征, 二者在时间上具有同步性。② OLR 异常在空间上紧紧围绕聊城—兰考断裂分布, 表明地震构造运动是德州平原地震 OLR 异常变化的主控原因, 而地震过程中 OLR 异常演变特征则是地震构造应力变化的辐射表征。③ 地震发生在 C 周期的波峰相位点附近, 结合同步监测到的 OLR 异常增强特征, 表明当地震构造应力积累到岩石破裂滑动的临界状态时, 引潮力大小和方向的突然改变促使聊城—兰考断裂失稳而诱发了地震。以上结果也说明 FY-3E 卫星 OLR 产品可较好地应用于地震红外异常研究。

关键词 德州 $M_S5.5$ 地震; FY-3E; 长波辐射; 引潮力

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)11-0609-10

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-065

OLR anomalies of the Dezhou $M_S5.5$ earthquake in Shandong Province based on FY-3E satellite data

Ma Weiyu¹⁾, Ji Wei²⁾, Yu Dan¹⁾, Li Jianyong¹⁾, Shao Yinxing¹⁾, Liu Jun³⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Zhongke Xingtu Weitianxin Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China

3) College of Disaster Prevention Science and Technology, Hebei Sanhe 065201, China

收稿日期: 2024-04-22; 采用日期: 2025-02-21。

基金项目: 亚洲合作资金防震减灾领域合作项目中国—东盟地震灾害监测防御能力提升项目 (12499901) 和风云三号 03 批气象卫星工程地面应用系统地质灾害监测应用 (FY-3(03)-AS-11.10-ZT) 联合资助。

* 通信作者: 马未宇 (1971-), 男, 研究员, 主要从事地震遥感监测研究工作。E-mail: weiyuma@163.com。



Abstract Based on the periodic variation of tidal forces, outgoing longwave radiation (OLR) data from the FY-3E satellite were used to analyze the daily variations of OLR from June 30 to August 30 in 2023 over a large area ($17^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E}\sim 136^{\circ}\text{E}$) of the Chinese mainland. In addition, correlations between tidal forces, OLR, and the $M_{\text{S}}5.5$ earthquake that occurred in Pingyuan County, Dezhou on August 6, 2023 were discussed. Analysis of OLR changes and the synchronous tidal force cycle revealed that: ① During the periods without earthquake tidal force changes (cycles A and B before the earthquake and D after the earthquake), OLR exhibited no significant variations near the epicenter, whereas continuous OLR anomalies were observed during the earthquake period (cycle C), accompanied by continuous variation in tidal force from trough to peak to trough. OLR anomalies show the stage characteristics of initial warming, strengthening, peak attenuation, and gradual calming, which are synchronous in time. ② OLR anomalies were closely distributed around the Liaocheng-lankou fault, indicating that seismic tectonic movement was the main cause of OLR anomalies associated with the earthquake, and the evolution of OLR anomalies during the earthquake represent the radiation of seismic tectonic stress changes. ③ The earthquake occurred near the peak phase point of cycle C, synchronous with the enhanced characteristics of the OLR anomalies. Therefore, when accumulated seismic tectonic stress exceeded the critical state of rock fracture and sliding, the sudden change in the size and direction of the tidal force promoted the instability of the Liaocheng-lankou fault and induced the earthquake. These results also show that the OLR products of the FY-3E satellite are useful for identifying seismic infrared anomalies.

Keywords Dezhou $M_{\text{S}}5.5$ earthquake; FY-3E satellite; outgoing longwave radiation; tidal force

0 引言

地震是断层在构造应力作用下发生构造变形破裂的结果,由于未来震中位置不能准确预知,基于站点的应力观测难以匹配大范围观测需求,无法实时有效捕捉孕震区构造应力变化,使地震预测仍然是世界科学难题。建立大尺度宏观物理场观测,监测与地震关联的物理参量变化,对地震预测具有重要意义。震前热异常变化现象早已被各国学者所关注^[1-2]。伴随遥感-岩石力学的发展,在岩石力学加载实验所记录的岩石受力破裂过程中,红外辐射阶段演化结果为地震遥感红外监测提供明确的物理实验依据。自20世纪80年代末期以来,诸多学者将大尺度卫星遥感技术应用于地震活动监测及地震前兆研究,并在地震红外辐射机理探索,地震热异常提取算法研究,大范围观测热相关物理量变化,间接获取构造应力信息^[3-4],地震预测实践等方面付诸实际,获得有效进展^[5]。

目前利用卫星红外数据开展震前热异常提取的方法包括:背景场差值分析法^[6]、卫星数据稳健分析技术(Robust Satellite Technique, RST)法^[7-8]、涡度算法^[9]、小波-功率频谱法^[10]等,这些方法不仅需要大量连续的多年历史数据,而且基于统计原理建立的正常背景场,会掩盖数据的微小波动,遗漏震前微弱的热异常信号,同时由于正常背景选取时间长度(5~10年等)的不确定性,导致不同的背景场会得到不同

的结果^[11-13]。地震是地球构造应力积累、快速释放能量的过程,具有持续性和短临突发性的特点,以上方法单纯利用遥感图像处理算法研究地震热异常,缺乏从力学的角度对地震发生的本质进行研究。因此,开展与力学相关联的热异常提取研究具有一定价值。已有研究表明,当地震孕育构造应力达到临震阶段时,天体引潮力有可能触发地震^[14]。引潮力可预先准确计算,且具有周期性变化规律,能够为地震热异常研究提供具有力学含义的时间指示,而热异常可为引潮力诱发的地震提供构造应力状态监视^[15-17]。针对2023年8月6日发生的德州平原5.5级地震,本文将天体引潮力与国产风云三号E星(FY-3E)的高分辨率长波辐射数据相结合,开展两种物理参量与地震的关联性研究,探索一种符合孕震环境下岩石受构造应力破裂过程中热辐射变化规律的热异常提取方法,检验国产风云卫星数据对大地震异常信息的监测响应能力。另外,为发挥遥感大范围监测的优势,将研究区扩展至全国范围($17^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $73^{\circ}\text{E}\sim 136^{\circ}\text{E}$)。

1 研究区构造环境

据中国地震台网正式测定,北京时间2023年8月6日2时33分在山东德州市平原县发生5.5级地震,震源深度10 km,震中位于(37.16°N , 116.34°E)。本次地震发生在华北平原南部聊城—兰考断裂(简

称聊考断裂)的东北部(图 1)。聊考断裂南起河南兰考县,向东北经山东聊城到达德州平原县,与广一齐断裂交会,大致呈北东向延伸,全长达 270 km,表现为东升西降的正断层活动性,它是鲁西隆起与华北断块拗陷的分界断裂。研究表明,聊考断裂属浅埋的隐伏活动断裂,第四纪以来的平均位错速率约为 0.12 mm/a,在中国东部属中等稍强的一类活动断裂^[18]。聊考断裂带是山东西部重要的地震断裂带,据统计,历史上沿该断裂带发生 5 级以上地震达 11 次,其中 1937 年在菏泽曾发生 7 级破坏性地震。

2 数据和方法

2.1 天体引潮力位计算

根据卡尔文的计算方法,任意天体 i 对地球内部任意一点 P 产生的起潮力位 $W_i(P)$ ^[19]:

$$W_i(P) = k \frac{M}{r_m} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r}{r_m} \right)^n P_n(\cos Z_m) \quad (1)$$

式中, $P_n(\cos Z_m)$ 为 $\cos Z_m$ 的 n 阶勒让德多项式, Z_m 为星体的天顶距, M 是星体的质量, k 为引力常数, r 为震中与地心的距离, r_m 为星体与地心的距离。

对于月亮,取 $n=2$ 和 $n=3$,则月球对地球任一点 P 产生的二阶和三阶引潮力位分别为:

$$W_{m2}(P) = \frac{3}{4} k \frac{M_m}{r_m} \left(\frac{r}{r_m} \right)^2 \left[(1 - 3 \sin^2 \varphi) \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \delta_m \right) + \sin 2\varphi \sin 2\delta_m \cos H_m + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta_m \cos 2H_m \right] \quad (2)$$

$$W_{m3}(P) = \frac{3}{4} k \frac{M_m}{r_m} \left(\frac{r}{r_m} \right)^3 \left[\frac{1}{3} (3 - 5 \sin^2 \varphi) \sin \delta_m (3 - 5 \sin^2 \delta_m) + 5 \sin \varphi \cos^2 \varphi \cos 2H_m + \frac{1}{2} \cos \varphi (1 - 5 \sin^2 \varphi) \cos \delta_m (1 - 5 \sin^2 \delta_m) \cos H_m + \frac{5}{6} \cos^3 \varphi \cos^2 \delta_m \cos 3H_m \right] \quad (3)$$

同理,对于太阳取 $n=2$,则太阳对地球任一点 P 产生的二阶引潮力位为:

$$W_{s2}(P) = \frac{3}{4} k \frac{M_s}{r_s} \left(\frac{r}{r_s} \right)^2 \left[(1 - 3 \sin^2 \varphi) \left(\frac{1}{3} - \sin^2 \delta_s \right) + \sin 2\varphi \sin 2\delta_s \cos H_s + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta_s \cos 2H_s \right] \quad (4)$$

对于地球整体,则有:

$$W_{\text{whole}}(P) = W_{m2}(P) + W_{m3}(P) + W_{s2}(P) \quad (5)$$

其中, M_s 和 M_m 是太阳和月亮的质量, φ 为震中纬度, δ_s 和 δ_m 是日、月赤纬, H_s 和 H_m 是日、月时角。

2.2 FY-3E 卫星 OLR 数据及其处理

2.2.1 FY-3E 卫星 OLR 数据

射出长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)是指地球大气系统向外层空间辐射出去的电磁波能量密度,它的时空分布反映了卫星观测区域下垫面的热状况^[20]。利用 FY-3E 卫星中分辨率光谱成像仪-微光型(Medium Resolution Spectral Imager-LL, MERSI-

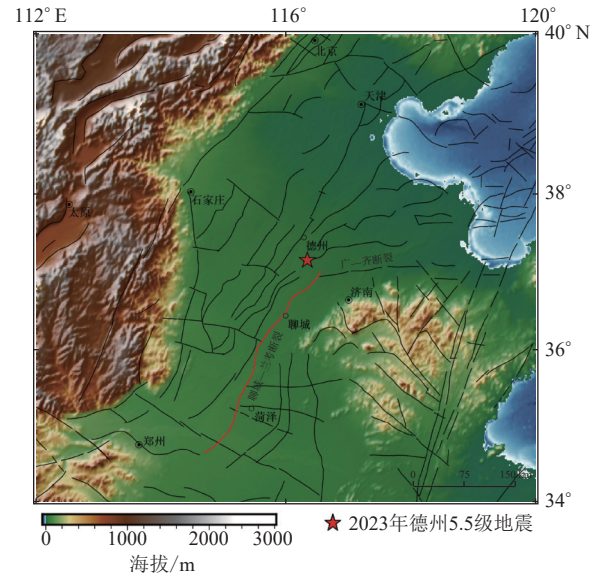


图 1 德州 5.5 级地震震中及周边主要活动断裂分布

Fig. 1 Distribution of major active faults around the epicenter of the Dezhou $M_{5.5}$ earthquake

LL)仪器的 4 个红外通道(红外波段: 7.2 μm 、8.55 μm 、10.8 μm 、12 μm)的辐射率测量值,经由一系列回归公式计算生成 OLR 日产品。该产品包括卫星过境时刻的升轨、降轨 2 个 OLR 格点场科学数据集,覆盖范围为 90°N~90°S、180°W~180°E,空间分辨率 0.05°×0.05°,采用 HDF5 格式存储。本研究选取 FY-3E 卫星的等经纬度投影的升轨 OLR 日产品,覆盖中国大陆范围(17°N~55°N, 73°E~136°E)。数据可通过国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网(<http://satellite.nsmc.org.cn/>)注册下载。

2.2.2 OLR 异常提取方法

为提取地震前后每天 OLR 数据的变化特征,采

用公式(6)对研究区域网格点的 OLR 数值进行计算,得到辐射增强区表征信息量的各格点位的数值分布。

$$\Delta T_i(lon, lat) = T_i(lon, lat) - T_{background}(lon, lat) \quad (6)$$

式中, $\Delta T_i(lon, lat)$ 代表格点 (lon, lat) 上的 OLR 数值增量; $T_i(lon, lat)$ 代表格点 (lon, lat) 上的 OLR 数值; $T_{background}(lon, lat)$ 代表固定背景日格点 (lon, lat) 上的 OLR 数值; lon 为大地经度, $lon = 1, 2, \dots, 360$; lat 为大地纬度, $lat = 1, 2, \dots, 180$; i 为日期。

3 结果与分析

3.1 德州地震天体引潮力变化分析

利用公式(5)计算地震前后(2023年6月20日—8月31日)德州5.5级地震震中位置的天体引潮力变化值,并绘制曲线(图2)。由图2可知,天体引潮力具有周期性变化的特点,连续经历了低谷—高峰—低谷的循环(标记为A、B、C、D)。已有研究表明,对于不同类型的发震断层,引潮力诱震的相位不同,逆断层型构造地震多发生在临近谷值处,正断层型构造地震多发生在引潮力峰值附近^[21]。8月6日山东德州5.5级地震发震时,引潮力处于最大振幅相位附近,与发震构造属正断层^[18]的认识相吻合。本次德州地震只发生在引潮力C周期内,而在震前6月30日—7月29日的A、B周期和震后半个月的D周期的相似相位没有发生地震,说明只有在活动构造应力积累到岩石破裂滑动临界状态时,引潮力才有可能触发地震。为判断发震构造应力累积状态,需要在引潮力变化周期背景下结合 OLR 时空演变特征做进一步分析。

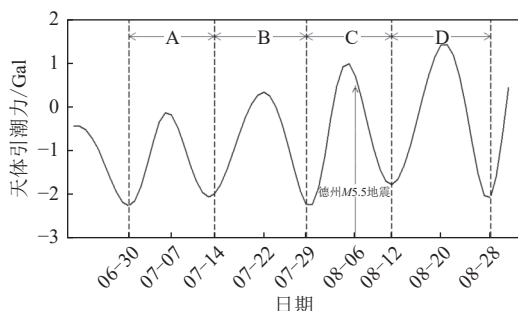


图2 德州地震前后天体引潮力随时间变化曲线

Fig. 2 Curve showing variation of tidal forces with time before and after the Dezhou earthquake

3.2 德州 $M_s 5.5$ 地震 OLR 异常时空演变特征

地震过程中,遥感热异常识别的背景日选取非常关键。本文依据潮汐力位变化周期(图2),以每个

周期的相位低点为参考,选取背景日期,消除多年统计处理方法中因背景时间选取的随机性造成地震热异常监测结论的不确定性。针对发震C周期,以7月29日的 OLR 数据为背景值,将7月30日—8月11日的逐日 OLR 数据按照公式(6)进行处理,获得该时段全国陆地范围($17^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$, $73^\circ\text{E} \sim 136^\circ\text{E}$)内的 OLR 连续变化情况(图3)。

如图3所示,在中国大陆范围内,仅震中及其邻近区域地震前后 OLR 出现明显变化。7月31日聊考断裂北段东侧附近出现微弱、小面积辐射异常;8月1—2日,OLR 异常强度增加,面积扩大,并迁移分布于聊考断裂两侧;8月3—4日,辐射幅度进一步增加,异常面积持续扩大;震前1天,8月5日震中附近异常消失;8月6日2时33分发生德州5.5级地震,截至6日8时,共发生余震59次,最大震级为3.0级,频繁地震活动导致地表破裂释放大量热辐射,反映在 OLR 变化图像上则表现为聊考断裂周围再次出现辐射异常;震后8月7—8日,OLR 异常强度逐渐衰减,面积持续收窄,至8月9日基本恢复平静;8月9日3时28分在山东菏泽市牡丹区(35.36°N , 115.38°E)发生2.6级地震,使得8月10日辐射异常再次增强,但持续时间较短,1天后的8月11日辐射异常重新衰减。由图3可知,在整个发震周期内,辐射异常在空间上呈现出孤立的北东向分布,与聊考断裂的位置相吻合,表明活动构造对辐射异常的发展具有控制作用。

对震前A、B周期和震后D周期的长波辐射数据,参照潮汐变化周期的相位低点选取背景日期,采用与发震周期相同的数据处理方法,获取 OLR 变化图像(图4、图5和图6)。由这些图可知,德州地震震中及聊考断裂附近未出现辐射异常,也没有发生地震。需要说明的是,因7月12日、7月30日、8月4日和8月21日研究区域的 OLR 数据小范围的缺失,导致对应时间的 OLR 变化图像上出现局部空白。

4 讨论和结论

利用 FY-3E 卫星的 OLR 数据,依据天体引潮力变化周期(图2)获得了德州5.5级地震前后的 OLR 时空演化图像(图3~图6),结果显示:

(1)在震前(A、B周期)和震后(D周期)的引潮力变化周期内,震中区域未出现辐射增强现象,也没有地震发生,仅C周期发生了地震,且同步出现了连续变化特征明显的长波辐射异常,表明出现在发

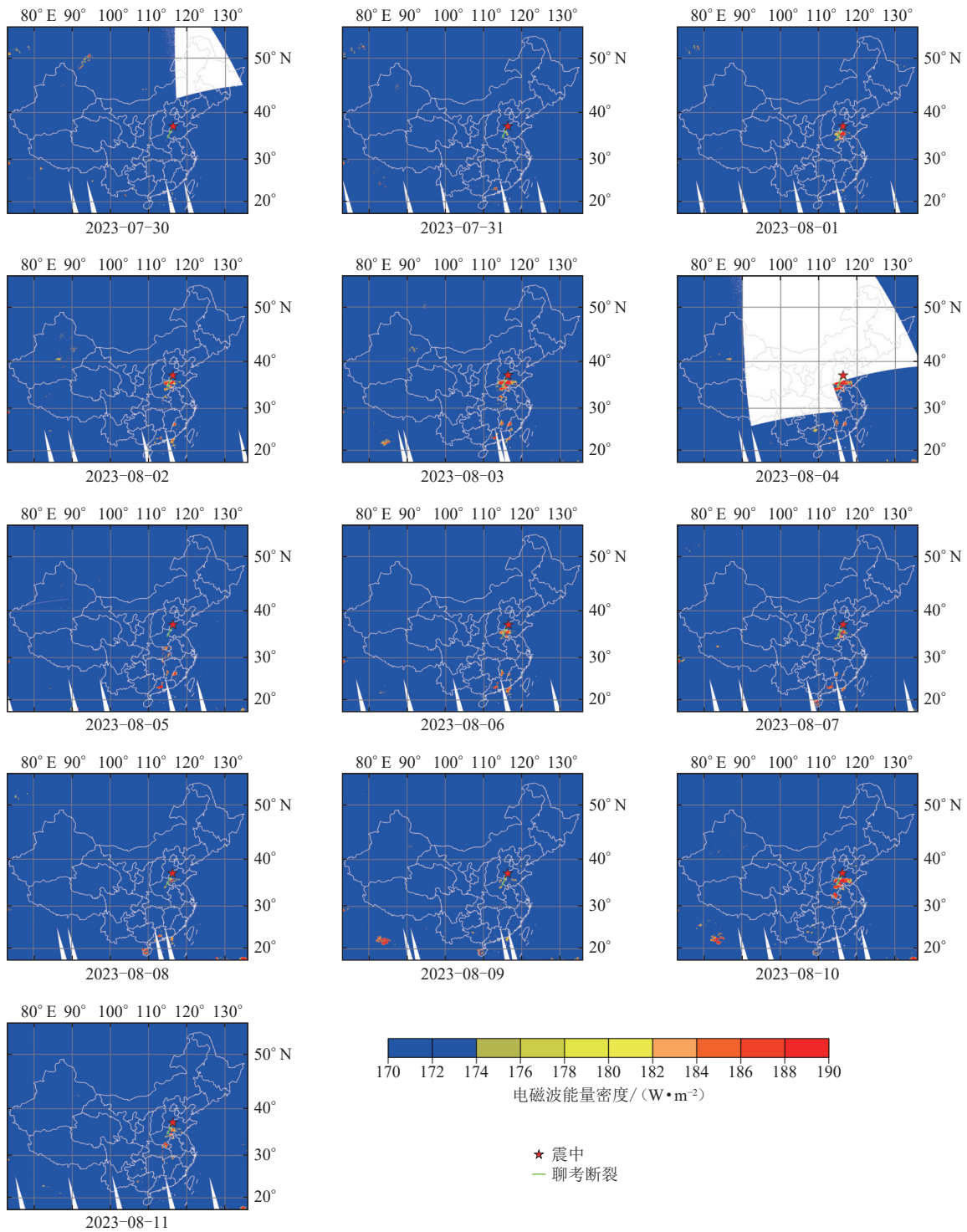


图 3 德州地震发震 C 周期 FY-3E 卫星 OLR 异常时空演变图像

Fig. 3 Space-time evolution of OLR anomaly in the FY-3E satellite data during the C-cycle of the Dezhou earthquake

震周期的 OLR 异常与地震存在关联, 以此推测当构造应力积累到岩石破裂滑动的临界状态时, 叠加上快速变化的天体引潮力附加构造应力, 有可能触发地震^[16]。

(2) 发震周期内的 OLR 异常(图 3), 在时间上呈

现出起始增温(7月31日)→加强(8月1—3日)→高峰(8月4日)→快速衰减(8月5日)→主震→再增强(8月6日)→逐渐平静(8月7—9日)的阶段特征, 演变过程与岩石受力破裂平均红外辐射温度经历初始增温→加强增温→相对平静的阶段性规律相

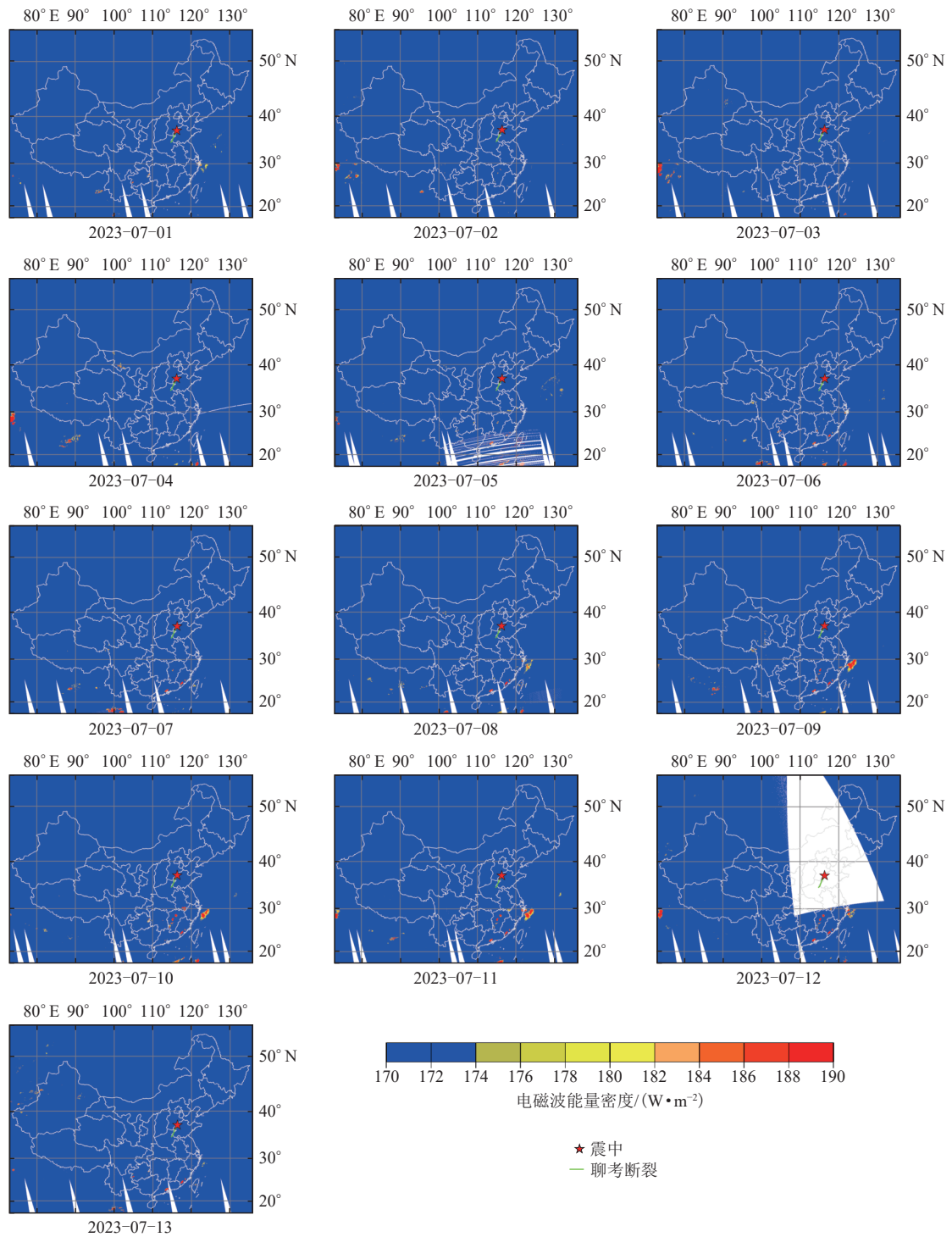


图4 德州地震震前 A 周期 FY-3E 卫星 OLR 异常时空演变图像

Fig. 4 Space-time evolution of OLR anomaly in the FY-3E satellite data during the A-cycle of the Dezhou earthquake

吻合^[22]。地震不是发生在异常增温达到高峰时,而是发生在异常增温快速衰退(8月5日)的阶段,与2013年4月20日芦山7.0级地震震前(4月19日)红外热异常的衰减表现一致^[23],这种临震前的衰减表征岩石应力变化进入闭锁期^[24-25],为地震的短临预测提供指示。OLR异常在空间上呈北东向、孤立

的条带状,集中沿聊考断裂分布,表明地震构造断裂的空间分布和加剧活动是 OLR 异常产生的主要原因。

综上所述,与引潮力变化周期同步的 OLR 异常是地震构造应力接近破裂临界状态的热像表征,在地应力足够的时候,引潮力通过改变下垫面构造应

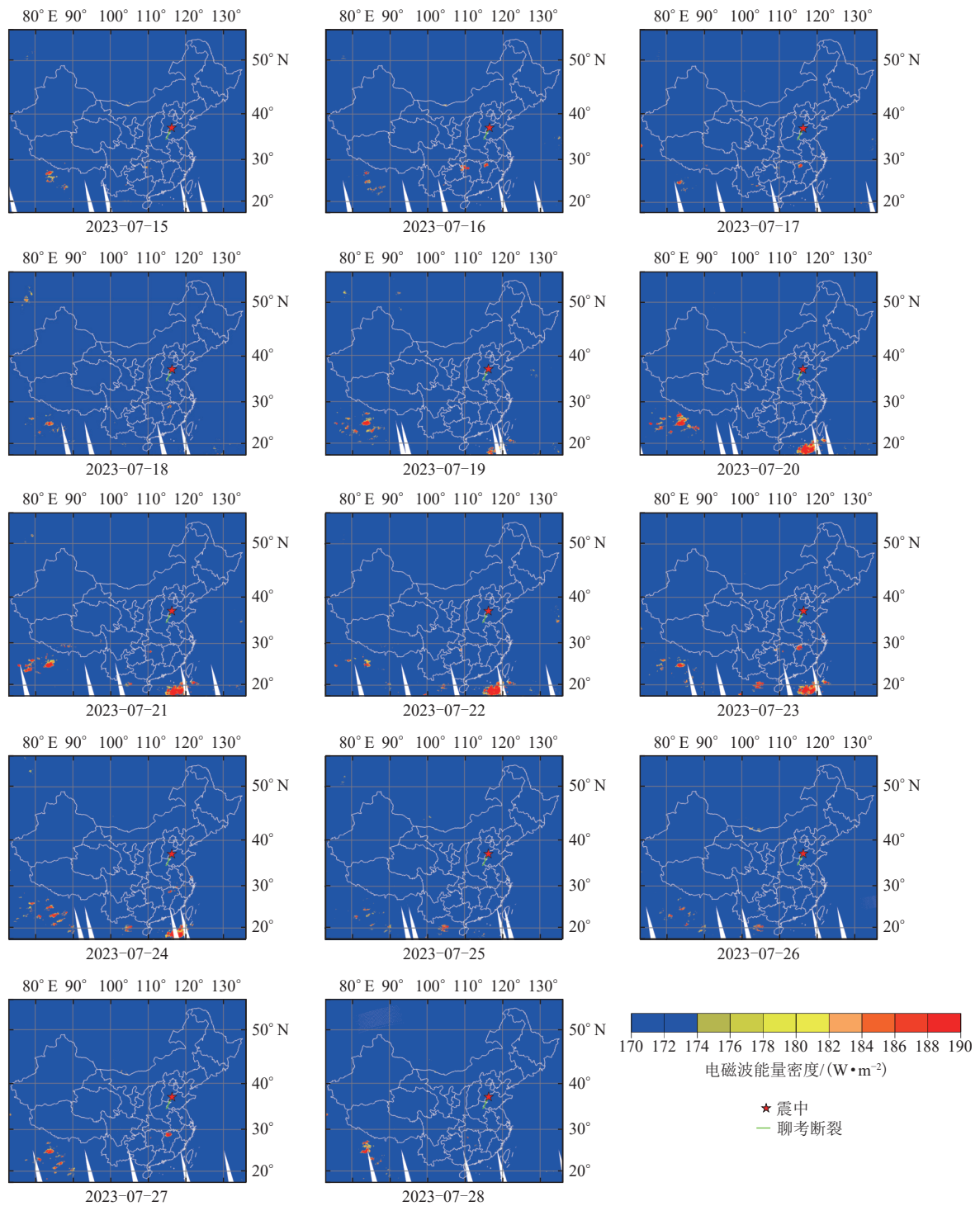


图 5 德州地震震前 B 周期 FY-3E 卫星 OLR 异常时空演变图像

Fig. 5 Space-time evolution of OLR anomaly in the FY-3E satellite data during the B-cycle of the Dezhou earthquake

力环境诱发了地震，认为本次 OLR 变化与德州 5.5 级地震活动相关。

本文将 FY-3E 卫星的地面长波辐射数据和天体引潮力结合开展地震热异常识别研究，取得了较好的监测效果，验证了 FY-3E 卫星 OLR 产品已具备应

用于地震热异常监测的能力，为推动国产卫星地震监测预测业务化应用提供了案例。未来需要深入研究引潮力诱震模式的物理机制，探索热异常的前兆性与规律性特征，以便提高特定区域强震前短临预测的能力。

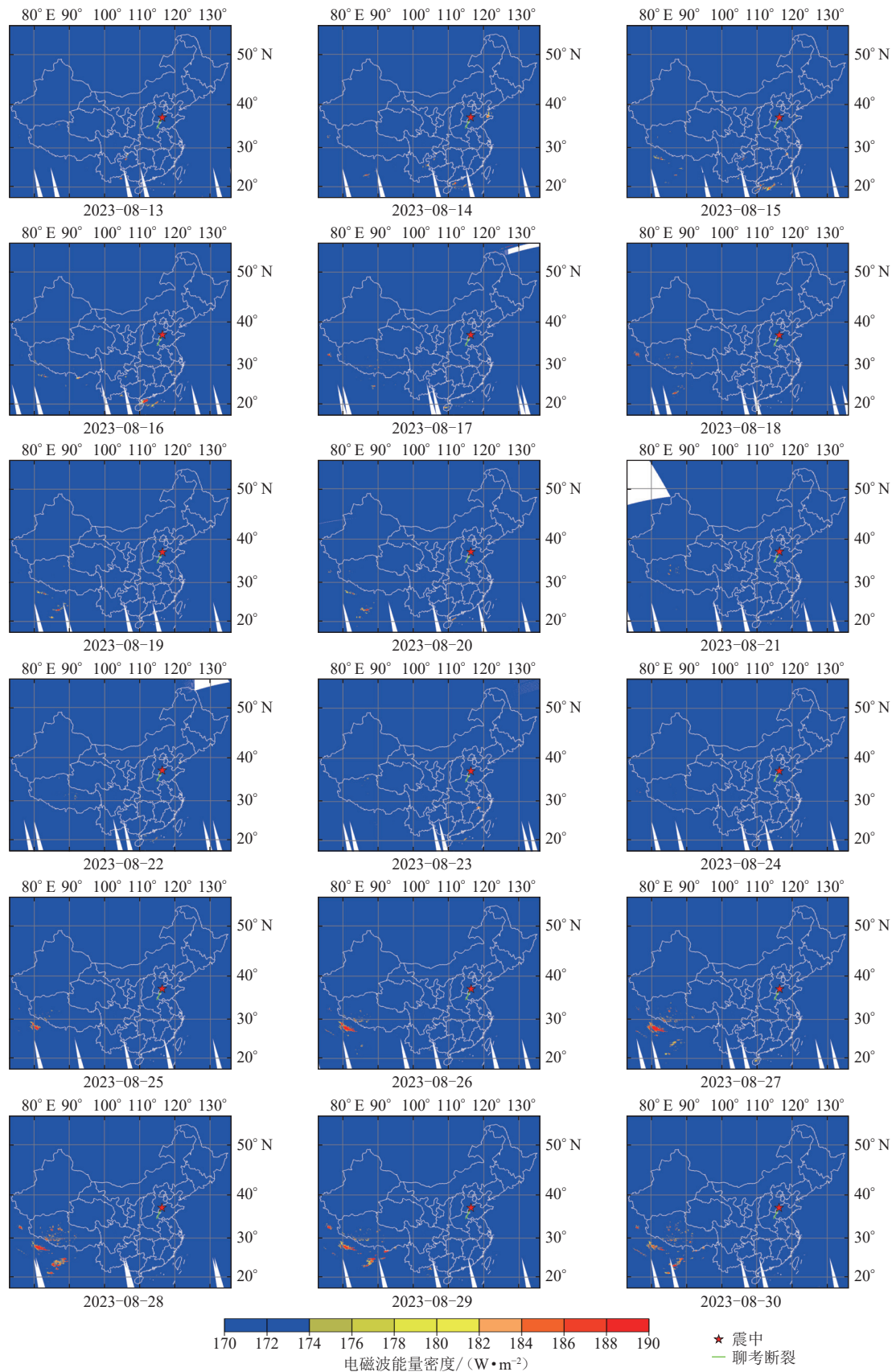


图 6 德州地震震后 D 周期 FY-3E 卫星 OLR 异常时空演变图像

Fig. 6 Space-time evolution of OLR anomaly in the FY-3E satellite data during the D cycle of the Dezhou earthquake

参考文献

- [1] Mogi K. Fundamental studies on earthquake prediction[C]//The organizing committee of ISCSEP. A collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquake prediction. Beijing: Seismological Press, 1984: 619-652
- [2] Qiang Z J, Kong L C, Zheng L Z, et al. An experimental study on temperature increasing mechanism of satellitic thermo-infrared[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, 10(2): 247-252
- [3] Milne J. Earthquakes and other earth movements[M]. London: Kegan Paul, Trench, Trübner and Co., Ltd., 1913: 213
- [4] Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, et al. The Earth's outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*, 1988, 301(1): 67-69
- [5] Ouzounov D, Bryant N, Logan T, et al. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999—2003[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, 31(4/9): 154-163
- [6] Saraf A K, Choudhury S. Thermal remote sensing technique in the study of pre-earthquake thermal anomalies[J]. *Journal of Indian Geophysical Union*, 2005, 9(3): 197-207
- [7] Tramutoli V, Cuomo V, Filizzola C, et al. Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (Izmit) earthquake, August 17, 1999[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3/4): 409-426
- [8] 孟亚飞, 孟庆岩, 张颖, 等. 基于夜间多时相遥感数据的热异常与地震的相关性[J]. *地震学报*, 2021, 43(1): 124-135
Meng Y F, Meng Q Y, Zhang Y, et al. Correlation between thermal anomalies and earthquakes based on nighttime multi-temporal remote sensing data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2021, 43(1): 124-135
- [9] 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 等. 昆仑山口西 8.1 级地震的卫星热红外前兆特征分析[J]. *西北地震学报*, 2003, 25(1): 12-15
Kang C L, Chen Z W, Chen L Z, et al. Analysis on the satellite infrared anomaly feature before west to Kunlun mountain pass $M_{8.1}$ earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2003, 25(1): 12-15
- [10] Zhang Y S, Guo X, Zhong M J, et al. Wenchuan earthquake: Brightness temperature changes from satellite infrared information[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1917-1924
- [11] 任静, 康春丽, 马未宇, 等. 临震天体引潮力和地面长波辐射 OLR 异常[J]. *中国地震*, 2015, 31(2): 447-455
Ren J, Kang C L, Ma W Y, et al. Preliminary study on the tidal force and Outgoing Longwave Radiation change[J]. *Earthquake Research in China*, 2015, 31(2): 447-455
- [12] 吴立新, 秦凯, 刘善军. 断裂活动及孕震过程遥感热异常分析的研究进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1470-1481
Wu L X, Qin K, Liu S J. Progress in analysis to remote sensed thermal abnormality with fault activity and seismogenic process[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1470-1481
- [13] Su B, Li H, Ma W Y, et al. The Outgoing Longwave Radiation analysis of medium and strong earthquakes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6962-6973
- [14] Xie C D, Lei X L, Wu X P, et al. Effect of tidal stress on fault nucleation and failure of the 2007 $M_{S6.4}$ Ning'er earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 397-407
- [15] Ma W Y, Wang H, Li F S, et al. Relation between the celestial tide-generating stress and the temperature variations of the Abruzzo $M=6.3$ earthquake in April 2009[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(3): 819-827
- [16] Ma W Y, Zhang X D, Liu J, et al. Influences of multiple layers of air temperature differences on tidal forces and tectonic stress before, during and after the Jiujiang earthquake[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 159-165
- [17] Zhang Y, Meng Q Y, Wang Z A, et al. Temperature variations in multiple air layers before the $M_{V6.2}$ 2014 Ludian earthquake, Yunnan, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 884
- [18] 向宏发, 王学潮, 魏顺民, 等. 聊城—兰考隐伏断裂第四纪活动性的综合探测研究[J]. *地震地质*, 2000, 22(4): 351-359
Xiang H F, Wang X C, Guo S M, et al. Integrated survey and investigation on the quaternary activity of the Liaocheng-Lankao buried fault[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(4): 351-359
- [19] 吴庆鹏. 重力学与固体潮[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 152-212
Wu Q P. Gravity and solid tides[M]. Beijing: Seismological Press, 1997: 152-212
- [20] 张婉春, 吴晓, 白文广, 等. 应用改进模式从 FY2H 卫星数据估算 OLR[J]. *气象与环境科学*, 2020, 43(3): 1-8
Zhang W C, Wu X, Bai W G, et al. The OLR estimation from FY2H VISSR data with an improved regression model[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2020, 43(3): 1-8

- [21] 马维旻, 彭望录, 马未宇, 等. 微地震震前热异常活动现象研究[J]. *遥感信息*, 2011, 33(1): 32-36
Ma W M, Peng W L, Ma W Y, et al. Tidal force of celestial bodies and temperature change of the three micro-earthquakes in China, March 2009[J]. *Remote Sensing Information*, 2011, 33(1): 32-36
- [22] Wu L X, Cui C Y, Geng N G, et al. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(6): 879-888
- [23] 马未宇, 康春丽, 解滔, 等. 芦山 $M_S7.0$ 地震前天体引潮力和 OLR 异常[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(5): 2047-2050
Ma W Y, Kang C L, Xie T, et al. The changes of the tidal force and the outgoing long-wave radiation of Lushan (China) $M_S7.0$ earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(5): 2047-2050
- [24] 马瑾, 陈顺云, 刘培洵, 等. 用卫星热红外信息研究关联断层活动的时空变化: 以南北地震构造带为例[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 816-823
Ma J, Chen S Y, Liu P X, et al. Temporal-spatial variations of associated faulting inferred from satellite infrared information: A case study of the N-S seismo-tectonic zone in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 816-823
- [25] 刘善军, 吴立新, 张艳博. 岩石破裂前红外热像的时空演化特征[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(7): 1034-1038
Liu S J, Wu L X, Zhang Y B. Temporal-spatial evolution features of infrared thermal images before rock failure[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(7): 1034-1038

=====

欢迎订阅 2026 年度《地震科学进展》

《地震科学进展》期刊简介: 本刊是中国科学技术协会主管、中国地震学会和中国地震局地球物理研究所联合主办、福建省地震局协办的地震科学综合性学术月刊。是地震系统内覆盖面广的优秀刊物之一, 创刊 55 年来以其独具特色的办刊宗旨和出版质量经久不衰。以多种形式刊登国内外在地震预报、地震预防和地震应急等防震减灾工作方面的新理论、新技术和新方法。设有综述与评述、学术论文、地震科普、重大工程与科研项目进展、探索与争鸣、中国地震学会动态等栏目, 以出版周期短、内容丰富、可读性强为自己的特色。

读者对象: 从事地震科学及相关学科研究工作的科技人员、地方地震工作人员、科技信息研究人员、大专院校有关专业的师生及从事相关管理工作的人员等。

征订办法: 本刊为月刊, 每期大 16 开、48 页, 定价 15.00 元(含邮费), 全年定价 180.00 元, 由本刊编辑部负责征订、发行, 订户可通过银行汇款。银行汇款请汇至: 中国工商银行北京海淀紫竹院支行 0200007609088104715 中国地震局地球物理研究所《地震科学进展》编辑部收。编辑部出具正式发票。

联系电话: 010-68729339

E-mail: rdws01@163.com

QQ 群: 960886168

本刊编辑部