

2021年四川泸县Ms6.0地震临震长波辐射变化检测

孙学霞^{1,2}, 崔静^{1,2}, 姜文亮^{1,2}, 马未宇³, 康春丽³, 李强^{1,2}

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;
2. 应急卫星工程与应用应急管理部重点实验室, 北京 100124;
3. 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要: 2021年9月16日四川省泸县发生 M_s 6.0地震, 利用FY-2H地面长波辐射数据产品(OLR)分析研究区8月27日至10月1日长波辐射异常分布及变化。结果显示, 研究区内震中东北部最先出现异常, 异常整体呈北西—南东分布; 时空演化呈现出初始增温—异常加强—高峰—衰减—平静的特征, 与岩石受力应变破裂所经历的微破裂—破裂—加速破裂—破裂过程演化特征吻合。结果表明, 天体引潮力对此次地震具有诱发作用, 长波辐射异常一定程度上表征了地震孕育过程中应力应变的辐射变化。之后, 利用NOAA卫星长波辐射产品数据追踪验证异常时段(9月11日—17日), 发现两者结果表现特征较为一致, 进一步说明了FY-2H卫星长波辐射数据可较好地应用于地震异常监测。

关键词: 遥感, FY-2H, 短临异常, 泸县地震, 长波辐射, 引潮力

中图分类号: P315.73/P2

引用格式: 孙学霞, 崔静, 姜文亮, 马未宇, 康春丽, 李强. 2024. 2021年四川泸县Ms6.0地震临震长波辐射变化检测. 遥感学报, 28(9): 2265–2275

Sun X X, Cui J, Jiang W L, Ma W Y, Kang C L and Li Q. 2024. Outgoing longwave radiation changes of the Ms6.0 Luxian earthquake based on tidal generating force. National Remote Sensing Bulletin, 28(9): 2265–2275 [DOI: 10.11834/jrs.20232267]

1 引言

随着社会快速发展, 社会经济及人口的分布与地震灾害影响范围重叠度逐步增加, 地震灾害的危害性进一步凸显, 加强地震灾害风险的监测预测研究, 是降低地震灾害风险的重要手段(魏成阶, 2009; Van Westen, 2002; 申旭辉等, 2018)。相较于传统的地面台站监测手段, 卫星遥感具备宏观大范围观测、全天候全天时、动态性强、回归周期互补贯通等优势, 对于开展多尺度时间和大尺度空间上的地震事件监测具备独特优势, 在防震减灾各业务领域中展现了广阔的应用前景, 成为推进地震监测预测能力提升的重要技术手段(申旭辉等, 2007; 李强等, 2022)。

自20世纪80年代末期以来, 地震红外辐射机

理、红外异常提取、异常统计分析等研究取得了重要进展, 红外遥感逐渐成为地震预报监测的一个重要手段(孟庆岩等, 2016; Ouzounov等, 2006; 吴立新等, 2017)。相较于中长期地震监测预测, 短临地震监测预警具有更重要的现实意义。

地震是地球构造应力积累、快速释放的过程, 如何判定地应力是否达到临界值是一个难点。近几十年以来, 许多学者研究发现, 天体引潮力与地球形变具有相关性, 且在时间域上具有一定的指示作用(马未宇等, 2006; Tanaka, 2012)。利用引潮力预测地震的研究始于20世纪80年代, 胡辉等(1993)对20世纪发生在国内7.0级以上强震进行统计分析, 定性描述了发震时间与天体之间的位置关系, 并推断天体位置通过引潮力、电磁力、宇宙辐射3种途径对地震产生影响。之后, 李

收稿日期: 2022-05-23; 预印本: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41772219); 应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项(编号:ZDJ2019-17); 高分遥感地震监测与应急应用示范系统二期(编号:31-Y30F09-9001-20/22-02)

第一作者简介: 孙学霞, 研究方向为红外遥感灾害信息提取与反演。E-mail: 790538012@qq.com

通信作者简介: 姜文亮, 研究方向为灾害遥感理论与应急观测技术研究及应用。E-mail: jiang_wenliang@163.com

晓明(1999)在对几个震例分析研究后明确提出,对于引潮力触发地震,应密切关注日、月引潮力。马未宇等(2006)较为系统地提出了TFFA(Tidal Force Fluctuant Analysis)算法,用于提取短期内热异常的变化。这种算法将引潮力和地应力相结合,进一步推动了地震红外遥感的应用。相较于国外成熟的RST(Robust Satellite Technique)算法(Tramutoli, 2007),其不需要大量的历史数据计算背景场;此外,相较于RST提取的热异常,TFFA算法提取的热异常在时空上更加稳定。例如,Su等(2021)使用BFA(Background Field Analysis)算法和TFFA算法处理了6场中强震,提取地震前后OLR异常变化,结果表明,TFFA算法提取的热异常分布更加清晰连续,异常演变符合应力作用下岩石破碎过程释放辐射的规律特征。目前该算法在国内外多场地震孕震过程分析中表现出较好地映震效果,可较好地反映地震过程对应的岩石在构造应力加载—准静态成核—动态破裂—应力重分布—断层强度再恢复的时间演化过程,例如任静等(2015)基于引潮力周期提取了4次5.0级以上地震OLR异常,异常增温演变趋势与岩石应力加载—破裂过程相吻合,表明了引潮力的附加构造应力对地应力处于临界状态的断层具有诱震作用。

然而,基于引潮力算法的震例分析,卫星数据多倾向于NCEP、NOAA等国外数据产品。国产卫星数据是否具有替代性直接关系到中国卫星业务的自主运行率,更是提升防灾减灾能力的重要支撑手段。因此,需要开展国产卫星遥感数据地震监测预测业务中的应用效能分析。目前中国风云系列卫星数据具有较高的时空分辨率,针对特定区域重访周期灵活多变等优点,为中国自主开展基于红外遥感地震监测业务提供了丰富的数据源(乐应波等, 2022)。新的数据源为地震监测预测理论方法提供了新的契机,有利于推动地震监测预测工作的信息化、业务化建设。

为了进一步验证TFFA算法,以及实验国产卫星在地震监测方面的应用效果,本研究拟以2021年9月16日发生的泸县 M_s 6.0地震为例,采用FY-2H卫星长波辐射数据产品,选取TFFA算法,监测长波辐射异常,对TFFA算法的适用性和效果进行验证。通过与NOAA提取结果对比,检验分析国产风云卫星数据对大地震异常信息的监测响应能力。

2 研究区概况

2021年9月16日凌晨4点33分31秒四川省泸州市泸县发生 M_s 6.0级地震,震中位于(29.20°N , 105.34°E),震源深度10 km。美国地质调查局(USGS)给出的地震初始破裂点位于(34.613°N , 98.246°E),地震矩 $M_0=1.836\times 10^{17}\text{ N}\cdot\text{m}$,震级为 M_w 5.44,震源深度为11.5 km;震源机制解节面I的走向为 279° 、倾角为 32° 、滑动角为 67° ,节面II的走向为 125° 、倾角为 61° 、滑动角为 104° 。国内学者(易桂喜等, 2021)获取的本次地震震源机制解节面I走向 286° 、倾角 45° 、滑动角 103° ,节面II走向 88° 、倾角 46° 、滑动角 77° 。震源机制解显示该地震为一次逆冲型错动事件。此次地震较强的震动引起房屋损毁,造成一定的人员伤亡。

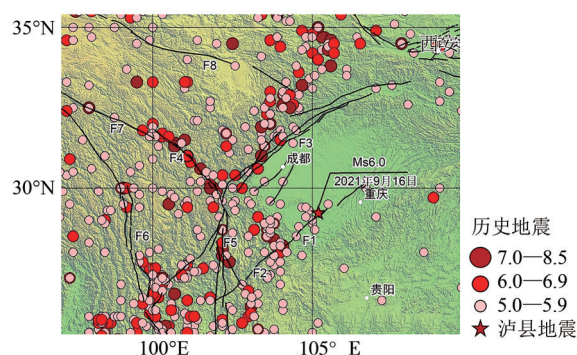


图1 泸县地震震中与区域部分主要活动断层分布图(黑线为区域部分主要活动断裂带,红色五角星标注为震中。F1:华蓥山断裂带;F2:莲峰断裂;F3:龙门山断裂带;F4:鲜水河断裂带;F5:安宁河断裂带;F6:金沙江断裂带;F7:甘孜—玉树断裂带;F8:东昆仑断裂带。图中地震源于地震资料中部分历史地震)

Fig. 1 Distribution map of the epicenter of the Luxian earthquake and some major active faults in the region (The black line is the main active fault zone in the region, and the red five-pointed star marks the epicenter. F1: Huayingshan fault; F2: Lianfeng fault; F3: Longmenshan fault; F4: Xianshuihe fault; F5: Anninghe fault; F6: Jinshajiang fault; F7: Ganzi-Yushu fault; F8: East Kunlun fault zone. The earthquakes in the figure originate from some historical earthquakes in the seismic data)

本次泸县6.0级地震是2019年6月17日长宁 M_s 6.0级地震后,发生在四川盆地东南边缘的又一次中强震。区域地震构造图显示本次地震发震构造更靠近四川盆地东南侧的华蓥山断裂带。华蓥山断裂带是以合川、邻水为界,是川中台拱与川东陷褶束两个三级构造单元的边界断裂,是四川

东部的一条重要的断裂带（徐世荣和徐锦华，1986）。断裂走向为北东45°，断面总体倾向南东，倾角30°—70°，具有右行走滑兼逆冲性质（周荣军等，1997）。该区域布格重力场显示了四川盆地具有相对比较完整的地壳结构与较高的地壳密度（姜文亮和张景发，2011）。该断裂带南西段活动性强于北东段，此次泸县地震震中就位于南段。1985年至今，断裂带表现出5级以上地震“平静—活跃”的时段分布特征。近20年以来，该断裂带5.0级以上地震发生过15次。统计近5年研究区域5.5级以上地震如表1。

表1 2016年1月至2021年6月研究区内Ms 5.5以上地震
Table 1 Earthquakes above Ms 5.5 in the study area from January 2016 to June 2021

序号	发震日期	纬度/°N	经度/°E	震级(Ms)	深度/km	位置
1	2021-05-22	34.59	98.34	7.4	17	玛多
2	2021-05-21	25.67	99.87	6.4	8	漾濞
3	2021-05-21	25.63	99.92	5.6	10	漾濞
4	2020-04-01	33.04	98.92	5.6	10	石渠
5	2019-10-28	35.10	102.69	5.7	10	夏河
6	2019-07-04	28.41	104.74	5.6	8	珙县
7	2019-06-17	28.34	104.90	6.0	16	长宁
8	2018-12-16	28.24	104.95	5.7	12	兴文
9	2018-09-08	23.28	101.53	5.9	11	墨江
10	2017-08-08	33.20	103.82	7.0	20	九寨沟
11	2016-01-21	37.68	101.62	6.4	10	门源

3 方法与数据

3.1 研究方法

月球和太阳引潮力引起的地球周期性弹性变形称为固体潮，固体潮汐应力是固体潮在地球内部引起的、具有周期性变化特征的应力（张晶等，2007）。天体引潮力是地应力产生的重要原因之一，这种外因积累可能是触发地震的重要因素（李金和蒋海昆，2011）。潮汐引力对地震具有临界触发效应，为利用引潮力开展地震短临预测研究提供了理论依据（蒋海昆等，2008；陈荣华等，2006）。TFFA算法主要是通过计算震中引潮力随时间的变化曲线，确定背景时间，提取临震辐射异常（马未宇等，2020）。此次发震断层属于浅层逆冲断层，本文尝试使用同类方法处理，提取临震异常，

进一步探索引潮力对地震的触发机制。

3.1.1 计算震中引潮力随时间变化曲线

日、月在震中产生的引潮力，与天体的天顶距、天体的质量、震中与地心距离等因素有关（张岩等，2016）。任意天体φ在地球内部一点产生的引潮力位为 $W_{\phi}(P)$ （吴庆鹏，1997）：

$$W_{\phi}(p) = k \frac{M}{r_m} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r}{r_m} \right)^n P_n(\cos z_m) \quad (1)$$

式中， $P_n(\cos z_m)$ 为勒让德多项式； z_m 为星体天顶距； M 为天体质量； k 为万有引力常数； r 为震中与地心的距离； r_m 为天体质心与地心距离。通过式（1）分别计算太阳和月球产生的引潮力位，最后两部分引潮力叠加得到震中日月引潮力位。计算得到泸县地震震中天体引潮力位变化图（图2）。

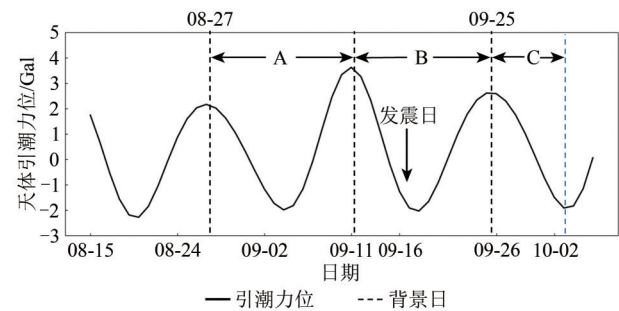


图2 震中天体引潮力时序变化曲线

Fig. 2 Time series change curve of tidal force of epicenter celestial bodies

3.1.2 确定参考背景时间,提取异常OLR

引潮力具有周期性连续变化的特点，通常将每个周期的起始相位视为地震相的前一个转折点，发震日所对应的引潮力相位与地震类型有一定关系（何苗等，2020；刘军等，2014）。正断层走滑型地震多发生在引潮力峰值附近，一般选择震前谷值作为背景日；逆断层型地震多发生在临近谷值处，选择震前峰值点作为这一阶段背景（陈大庆等，2011；孙长青等，2014）。通过对震源机制分析，显示此次地震为一次逆冲型错动事件，因此将距离发震时刻最近的引潮力峰值出现日期作为背景日。之后，计算研究时段的 ΔOLR ，再确定阈值进行异常提取。 ΔOLR 计算如下：

$$\Delta OLR = OLR_i - OLR_b \quad (2)$$

式中， OLR_i 为*i*日某一单点时刻OLR值； OLR_b 为背景日的OLR值。

3.2 数据

3.2.1 FY-2H卫星OLR数据处理

FY-2H卫星是中国第一代静止气象卫星风云二号系列的第6颗业务卫星，主要载荷是扫描辐射计和空间环境监测器。本文使用的数据为扫描辐射计所获取的数据产品，包括1个可见光和4个红外通道。选取震前（8月28日至9月2日）和震后（9月27日至10月1日）每日北京时间11:00点OLR数据产品，针对发震周期（9月12日至17日），每日选取北京时间11:00、14:00和22:00等3个单点时刻的标称格式OLR数据产品。对所获取的数据按照式（2）进行处理，获得各时段OLR的变化。

图3为不同时段 Δ OLR频次分布图3（a）是以8月27日作为背景日，8月28日至9月2日11时的 Δ OLR分布图；（c）、（d）和（e）是以9月11日作为背景日，9月12日至17日11时、14时和22时的 Δ OLR分布图；（d）是以9月25日作为背景日，9月26日至10月1日11时的 Δ OLR分布图。表2统计不同时段 Δ OLR的均值（ μ ）、标准差（ ρ ）以及偏度（Kurt）和峰度（Skew）。根据偏度定义中，偏度 >0 属于非正态分布的正偏分布；峰度定义中，峰度 <3 属于非正态分布的瘦尾，定量判断 Δ OLR频次分布类型。确定 Δ OLR频次分布是非正态分布，故阈值设置为： $\varphi = \mu + 3\rho$ （Zhang等，2021）。对数据按照阈值分级显示，并使用最邻近插值法对数据做插值处理，输出图像（图5—图7）。

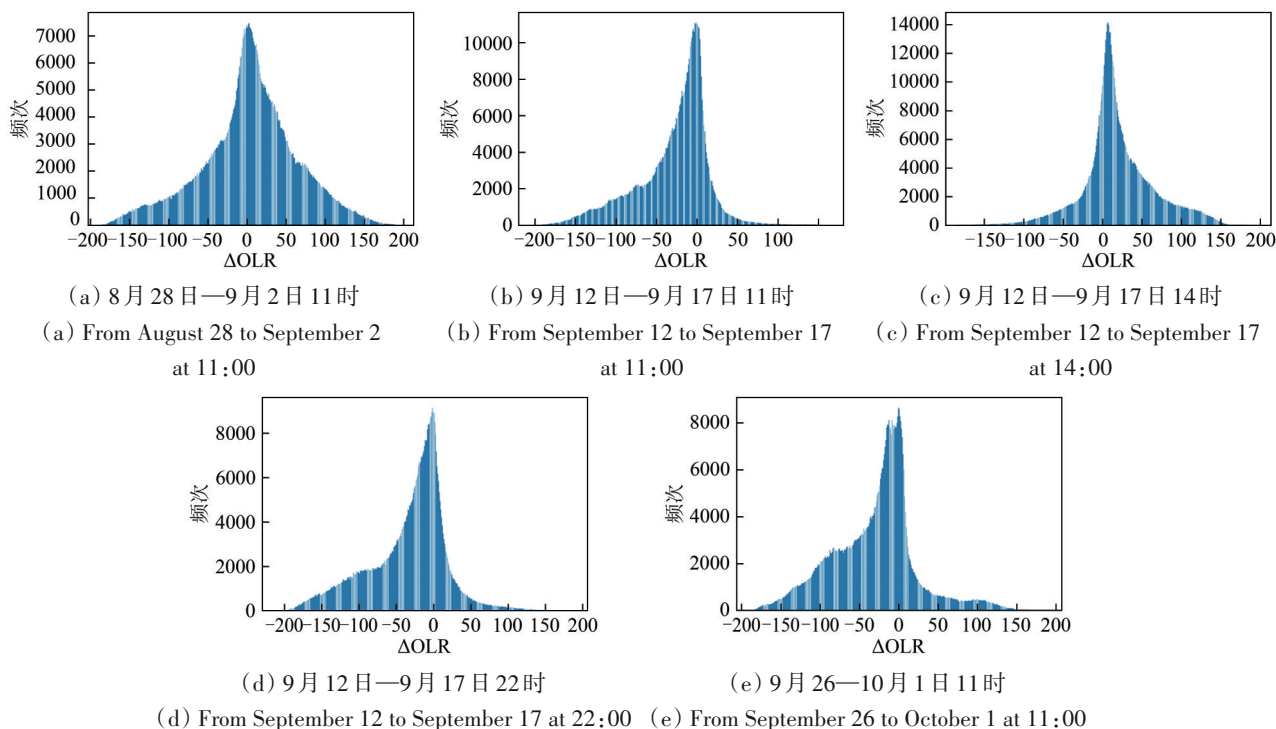


图3 Δ OLR频次分布

Fig. 3 Frequency distribution of Δ OLR

表2 Δ OLR分布参数及阈值

Table 2 Δ OLR distribution parameters and thresholds

背景日	图名	均值 $\mu/(w/m^2)$	标准差 $\rho/(w/m^2)$	偏度 Kurt	峰度 Skew	阈值 $\varphi/(w/m^2)$
8月27日	图3(a)	3.96	60.03	0.29	-0.23	184.05
	图3(b)	-28.50	43.37	0.97	-0.83	101.61
9月11日	图3(c)	-33.04	52.24	0.65	-0.49	123.68
	图3(d)	-29.29	53.06	0.73	0.06	129.89
9月25日	图3(e)	19.57	45.11	1.26	0.13	154.90

统计发震周期各监测时刻异常最值 M ，记 λ 为异常最值相对阈值变化率，以该值表征地震引起

的热异常强度的相对大小，进一步表明临震状态下，长波辐射的强烈程度。

$$\lambda = \begin{cases} \frac{(M - \varphi)}{\varphi} & M > \varphi \\ \varphi & \\ 0 & M \leq \varphi \end{cases}$$

式中, M 为监测时刻的异常最值, φ 为阈值, λ 为异常最值相对阈值变化率。以发震周期为横轴, 异常最值相对阈值变化率为纵轴, 绘制异常最值相对阈值变化率图(图4), 分析异常变化。

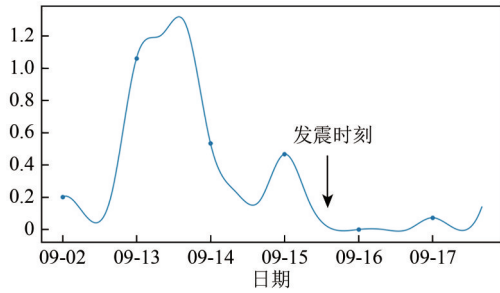
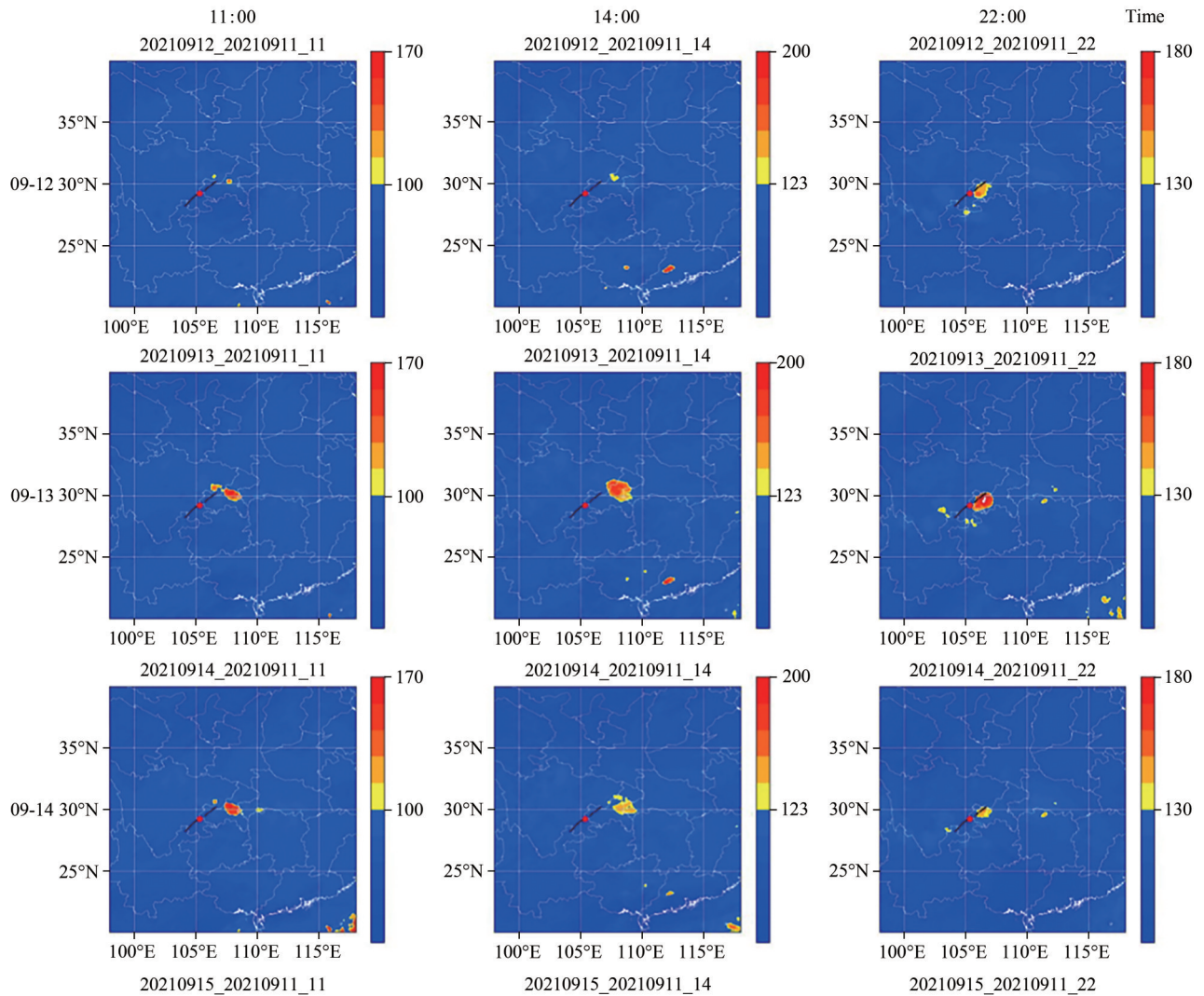


图4 异常最值相对阈值变化率
Fig. 4 The rate of change of the abnormal maximum value relative to the threshold value

3.2.2 NOAA卫星数据处理

美国NOAA极轨卫星从1970年12月第一颗发射以来, 连续发射了18颗, 使用较多的是第五代。本次使用的是NOAA-18卫星的OLR白天均值数据产品, NOAA-18发射时间是2005年5月11日, 轨道周期102 min。传感器采用改进型甚高分辨率辐射计(AVHRR/3), 包括5个波段, 分别为可见光红色波段、近红外波段、中红外波段和两个热红外波段, 星下点分辨率1.1 km。NOAA长波辐射数据有 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 和 $1^\circ \times 1^\circ$ 两种数据, 本次研究选择的是 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的网格数据。数据以ASCII格式存储在(360×180)数组中, 每个值代表 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 度网格上的OLR通量。该数据可免费获取(下载网址: ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/noaa18_1x1[2022-05-23])。对下载的长波辐射产品经另存解析得到白天均值数据, 按照式(2), 9月12日至17日数据分别减去11日数据, 按照经验阈值法, 取阈值 $\varphi_2=37$, 得到差值图像(图8)。



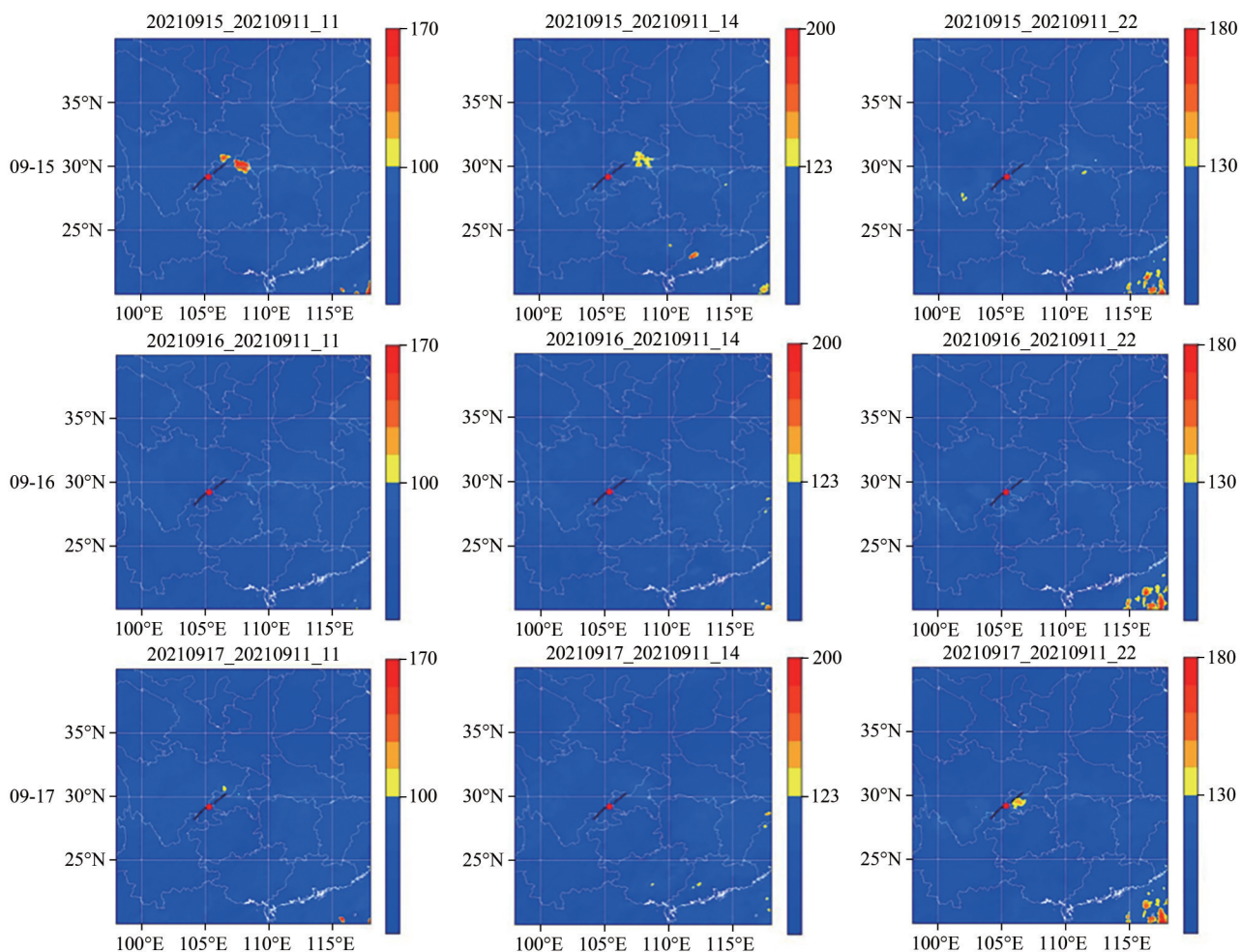


图5 四川泸县 M_s 6.0地震FY-2H卫星OLR异常时空演变图像(图中黑线为华蓥山断裂带,红点标注为震中(单位: w/m^2))
 Fig. 5 The spatiotemporal evolution of the FY-2H satellite OLR anomaly of the Luxian M_s 6.0 earthquake in Sichuan
 (The black line is the Huayingshan fault zone, and the red dot is the epicenter (unit: w/m^2))

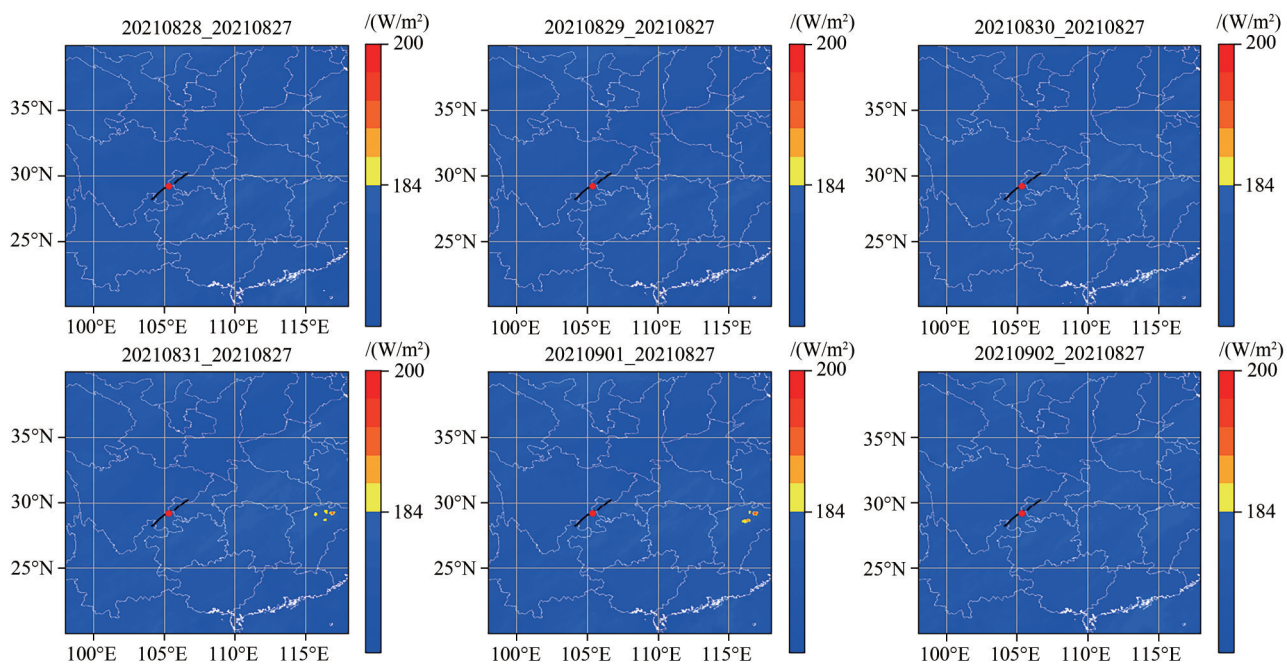


图6 四川泸县 M_s 6.0震前FY-2H卫星11:00时刻 Δ OLR图像(图中黑线为华蓥山断裂带,红点标注为震中)
 Fig. 6 Δ OLR image of the FY-2H satellite at 11:00 before the M_s 6.0 earthquake in Luxian County, Sichuan
 (The black line is the Huayingshan fault zone, and the red dot is the epicenter (unit: w/m^2))

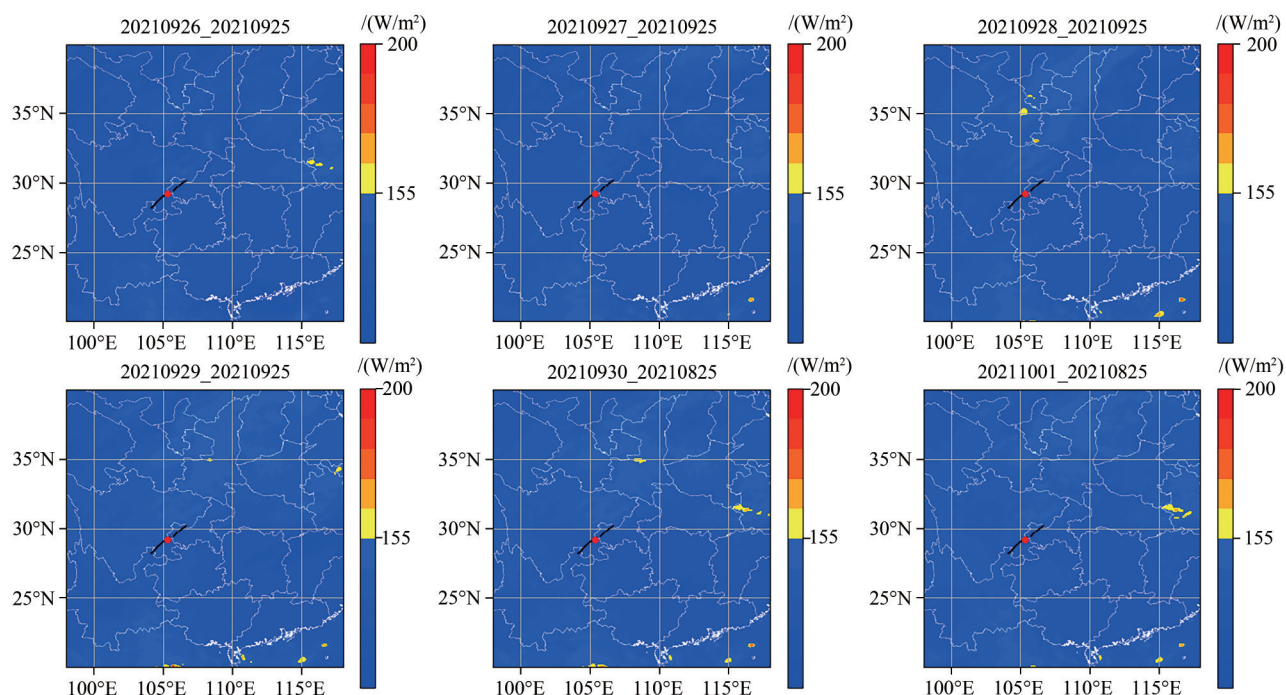


图7 四川泸县 Ms_{6.0}震后FY-2H卫星11:00时刻ΔOLR图像(图中黑线为华蓥山断裂带,红点标注为震中)
 Fig. 7 ΔOLR image of the FY-2H satellite at 11:00 after the Ms_{6.0} earthquake in Luxian County, Sichuan
 (The black line is the Huayingshan fault zone, and the red dot is the epicenter)

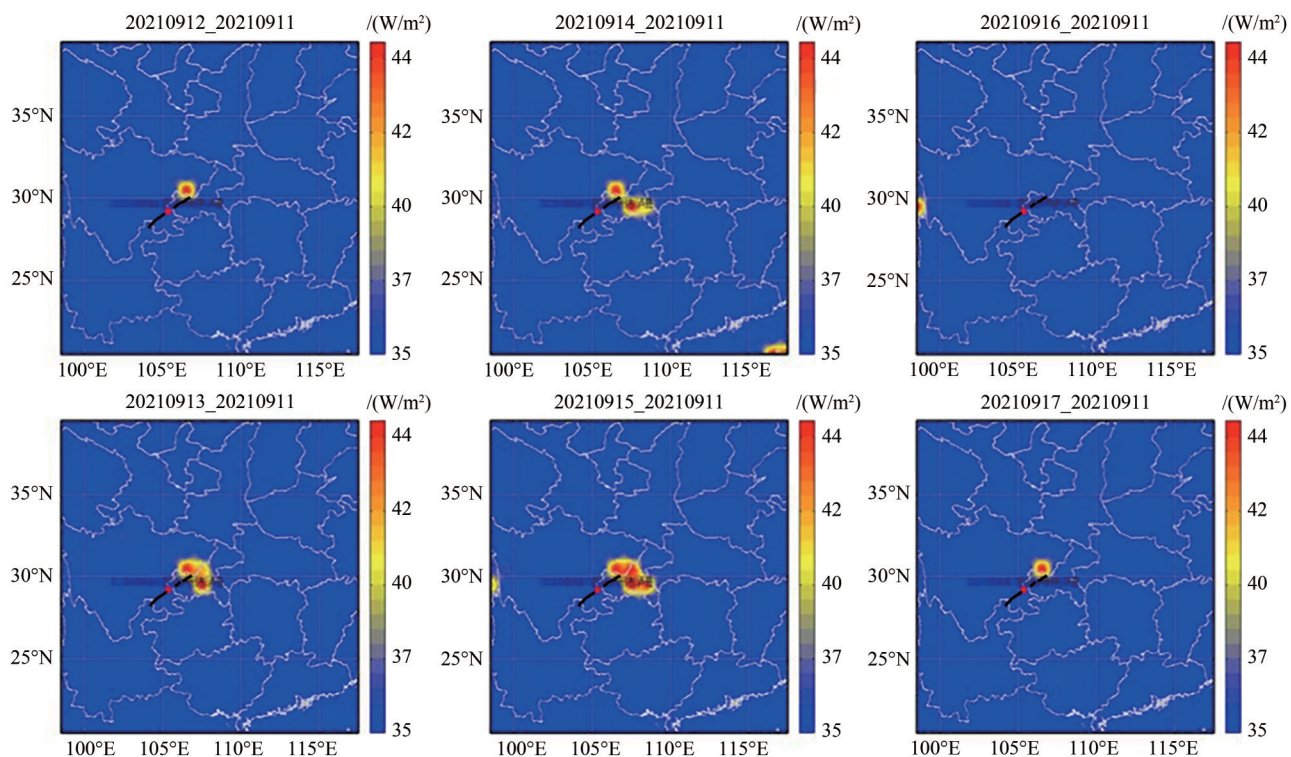


图8 四川泸县 Ms_{6.0}地震 NOAA卫星 OLR异常时空演变图像(图中黑线为华蓥山断裂带,红点标注为震中(单位:w/m²))
 Fig. 8 Spatial and temporal evolution image of NOAA satellite OLR anomaly of Luxian Ms_{6.0} earthquake in Sichuan
 (The black line is the Huayingshan fault zone, and the red dot is the epicenter (unit:w/m²))

4 结果分析

如图5所示,9月12日发震断层北东向最先

出现异常,异常面积相对较小,从11点至22点,异常强度增加,面积扩大,并逐渐靠近震中。9月13日,异常面积进一步扩大,22点时在距离震中

一定距离的东南和西南向也出现小范围低程度的异常；14日异常出现强度下降，面积减小的趋势，至15日22时异常首次完全消失；16日为发震日，异常在监测的3个时刻均未出现；在17日11点和22点监测到小范围异常。纵向来看，在发震前3天即9月13日异常到达峰值，之后逐渐下降直到发震，每日22时监测到的异常距离震中相对较近。整个过程地震辐射异常呈现出起始增温—异常加强—高峰—衰减—平静的特征，与吴立新等(2004)实验监测到的构造地震岩石破裂的热红外辐射规律：红外异常增温呈现初始增温→加强增温→相对平静3个阶段对应性较强。辐射异常空间范围围绕华蓥山断裂带分布，断裂带呈南西—北东向，异常呈北西—南东向，异常分布与断裂带呈现十字交叉关系。对震前和震后周期的长波辐射监测如图6、图7，图中并未出现热辐射异常，进一步说明，基于引潮力监测的发震周期异常与地震相关。分布于发震断层周围的异常最值，可以反应孕震过程红外辐射强度。在监测时段内，9月12日11时出现的异常最大值为 122 w/m^2 ，至13日22时增大到峰值，为 188 w/m^2 。之后异常最值出现下降且下降幅度逐渐变缓，至15日22时到达 125 w/m^2 且低于该日异常提取阈值，在图像上表现为异常消失；16日发震，已经没有异常出现。

图9为加载岩石过程中岩石表面平均红外辐射温度(AIRT)随时间变化，从图9中可以看出，变化具有阶段性规律，加载微破裂阶段(I)，辐射温度没有空间分异现象；破裂和加速破裂阶段，对应图中II和III阶段，辐射温度呈现上升趋势，之后进入解锁阶段先降后升(IV)，屈服破裂阶段出现下降(V)。

由图4可以看出，异常最值相对阈值变化率表现为出现—加强—高峰—衰减—平静的特征，与图9中岩石受力应变破裂所经历的微破裂—破裂—加速破裂—破裂过程对应的岩石表面平均红外辐射温度(AIRT)演化特征吻合。

图8为NOAA卫星OLR白天均值数据产品长波辐射异常提取结果。异常从9月12日至15日增强，异常由震中北东向逐渐向震中东部扩散，至16日异常消失，震后首日出现零星小范围异常。通过对比可以看出，在整个发震周期两个卫星载荷提取的长波辐射异常时空演化和分布特征整体趋势非常吻合。

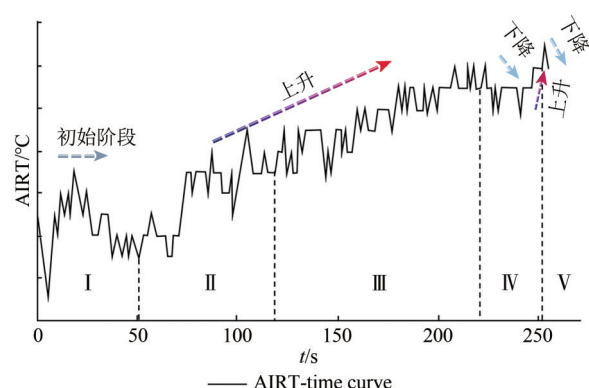


图9 岩石加载过程中AIRT-时间曲线图
(修改自马未宇, 2006)

Fig. 9 AIRT-time curve during rock loading
(Modified from Ma, 2006)

5 结论

本次研究基于TFFA算法提取了临震红外辐射异常，回溯性地做短临地震监测预测尝试。文中利用FY卫星单点OLR数据提取了震前一周连续且变化特征明显的红外辐射异常，识别了临震红外异常的发展演变情况。研究结果显示异常分布与地震构造存在交叉分布、演变过程与岩石破裂热红外辐射规律相对应的特征。对震前A时段及震后C时段进行监测并未发现长波辐射异常情况，因此推测只有构造应力积累到岩石破裂滑动的临界状态时，引潮力才有可能触发地震，所提取到的异常极有可能是这个过程中能量释放的一种表现。这与马未宇等(2014)利用此方法获取的芦山 $M_s 7.0$ 地震长波辐射演化基本一致。本次使用FY-2H同日不同时刻数据动态的监测热异常变化，排除了部分环境因素的影响；通过异常最值相对阈值变化率作为定量指标表征了异常强度。

提取地震辐射异常过程中，背景日的选取对结果具有决定性影响。此次震例研究属于回溯性分析，因此文中通过震后震源机制确定发震断层类型，进而确定背景日。若利用此方法进行震前异常监测预测时，可以通过获取断层数据库，判断研究区域断层性质，依据断层性质，选择背景日。

利用NOAA-18卫星OLR数据产品，追踪监测发震周期时段，发现与FY-2H所提取的异常值相比量级存在较大差异，造成这种差异的原因可能有3方面，首先获取数据的载荷不同，且二者轨道高度差异巨大；其次NOAA-18的OLR数据为白天均值数据，而FY-2H卫星OLR数据为单点时刻数

据;第3个原因是两种OLR产品反演方式不同。

两者异常结果时空分布及演化表征基本一致,验证了国产卫星数据地震长波辐射异常监测的能力,同时也表明FY-2H单点时刻OLR数据产品监测热异常效果较好,进一步反映了国产卫星进行地震短临预测研究的可行性。为推动国产卫星地震监测预测业务化应用提供了较好的应用案例。

参考文献(References)

- Chen D Q, Yang M L and Liu J. 2011. On tidal force triggering of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake and its strong aftershocks. *Earthquake*, 31(2): 24-32 (陈大庆, 杨马陵, 刘锦. 2011. 汶川8.0级地震及强余震破裂方式与引潮力之间的关系. *地震*, 31(2): 24-32) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2011.02.003]
- Chen R H, Xue Y, Zheng D L and Ding X. 2006. Discussion on mechanism concerning relation between tidal force triggering of significant shocks and large earthquake. *Earthquake*, 26(1): 66-70 (陈荣华, 薛艳, 郑大林, 丁香. 2006. 引潮力对显著地震触发作用与大震关系的机理讨论. *地震*, 26(1): 66-70) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2006.01.009]
- 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. *National Remote Sensing Bulletin*, 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 H, Li X M, Wang R and Zhao H S. 1993. Analysis of relationship between strong earthquakes and positions of celestial objects during 20th century in China. *Journal of Natural Disasters*, 2(3): 80-84 (胡辉, 李晓明, 王锐, 赵洪声. 1993. 20世纪中国强震与天体位置关系分析. *自然灾害学报*, 2(3): 80-84) [DOI: 10.13577/j.jnd.1993.0312]
- Jiang H K, Li M X, Wu Q and Song J. 2008. Features of the May 12 M 8.0 Wenchuan earthquake sequence and discussion on relevant problems. *Seismology and Geology*, 30(3): 746-758 (蒋海昆, 黎明晓, 吴琼, 宋金. 2008. 汶川8.0级地震序列及相关问题讨论. *地震地质*, 30(3): 746-758) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2008.03.013]
- Jiang W L and Zhang J F. 2011. Deep structures of Sichuan-Yunnan region derived from gravity data. *Progress in Geophysics*, 26(6): 1915-1924 (姜文亮, 张景发. 2011. 川滇地区重力场与深部结构特征. *地球物理学进展*, 26(6): 1915-1924) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011]
- Li Q, Geng D, Zhang J F and Gong L X. 2022. Application and trend analysis of remote sensing technology for earthquake emergency investigation. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(10): 1920-1934 (李强, 耿丹, 张景发, 龚丽霞. 2022. 面向地震应急调查的遥感应用现状及趋势分析. *遥感学报*, 26(10): 1920-1934) [DOI: 10.11834/jrs.20210078]
- Li J and Jiang H K. 2011. A review on tidal triggering of earthquakes. *Earthquake*, 31(4): 36-47 (李金, 蒋海昆. 2011. 潮汐触发地震研究进展综述. *地震*, 31(4): 36-47) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2011.04.004]
- Li X M. 1999. Analyses of positions of celestial objects during the earthquakes from Menglian to Baotou in China. *Progress in Geophysics*, 14(4): 102-108 (李晓明. 1999. 孟连至包头地震期间地震的天体位置分析. *地球物理学进展*, 14(4): 102-108)
- Liu J, Liu X Y, Bo H G, Zong C and Ma W Y. 2014. Spatio-temporal dynamic variation of thermal anomalies before and after the 2005 Jiujiang M_s 5.7 earthquake based on the modulation of additive tectonics stress induced by tide-generating force. *Acta Seismologica Sinica*, 36(3): 514-521 (刘军, 刘小阳, 薄海光, 宗超, 马未宇. 2014. 基于引潮力附加构造应力调制的九江地震热异常时空动态过程研究. *地震学报*, 36(3): 514-521) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-3782.2014.03.016]
- Ma W Y. 2006. The Research on the Satellite Infrared Temperature Increase Abnormal of NCEP and the Astro-Tidal-Trigging to Forecast Short Impending Earthquake. Hangzhou: Zhejiang University (马未宇. 2006. 基于NCEP卫星红外增温异常与天体引潮力的地震短临预测应用研究. 杭州: 浙江大学)
- Ma W Y, Kang C L, Xie T, Ren J and Zhong X H. 2014. The changes of the tidal force and the outgoing long-wave radiation of Lushan (China) M_s 7.0 earthquake. *Progress in Geophysics*, 29(5): 2047-2050 (马未宇, 康春丽, 解滔, 任静, 仲小红. 2014. 庐山 M_s 7.0地震前天体引潮力和OLR异常. *地球物理学进展*, 29(5): 2047-2050) [DOI: 10.6038/pg20140508]
- Ma W Y, Xu X D, Xu B H, Zhang X C and Xu J. 2006. Relationship between the Indonesia M_w 9.0 earthquake sequence and the temperature increasing anomaly with Astro-tidal-triggering. *North-eastern Seismological Journal*, 28(2): 129-133, 158 (马未宇, 徐秀登, 徐保华, 张行才, 徐杰. 2006. 印度尼西亚 M_w 9.0地震序列与增温异常和天体引潮力的相关关系研究. *西北地震学报*, 28(2): 129-133, 158)
- Ma W Y, Yu C, Yao Q, Yuan Z Y, Cui J and Ren J. 2020. Temporal and spatial variation of thermal parameters from remote sensing related to Tangshan M_s 5.1 earthquake of July 12, 2020. *Earthquake Research in China*, 36(3): 367-374 (马未宇, 于晨, 姚琪, 苑争一, 崔静, 任静. 2020. 2020年7月12日唐山 M_s 5.1地震遥感热参量时空变化分析. *中国地震*, 36(3): 367-374) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4683.2020.03.001]
- Meng Q Y, Lu X, Shao N Q, Shen X H, Geng F and Wang Y Y. 2016. Research progress in earthquake infrared background field and brightness temperature background field foundation of the demonstration areas. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 438-447 (孟庆岩, 卢显, 邵楠清, 申旭辉, 耿飞, 王园园. 2016. 地震红外背景场研究进展与示范区亮温背景场构建. *地震学报*, 38(3): 438-447) [DOI: 10.11939/jass.2016.03.011]
- Ouzounov D, Bryant N, Logan T, Pulinets S and Taylor P. 2006. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999-2003. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4/9): 154-163 [DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.036]

- Ren J, Kang C L, Ma W Y, Yang T Q and Lin X Y. 2015. Preliminary study on the tidal force and outgoing longwave radiation change. *Earthquake Research in China*, 31(2): 447-455 (任静, 康春丽, 马未宇, 杨天青, 林向洋). 2015. 临震天体引潮力和地面长波辐射 OLR 异常. *中国地震*, 31(2): 447-455 [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4683.2015.02.031]
- Shen X H, Wu Y and Shan X J. 2007. Remote sensing application in earthquake science and general proposal for earthquake satellite project in China. *Recent Developments in World Seismology*, (8): 38-45 (申旭辉, 吴云, 单新建). 2007. 地震遥感应用趋势与中国地震卫星发展框架. *国际地震动态*, (8): 38-45 [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4975.2007.08.011]
- Shen X H, Zhang X M, Cui J, Zhou X, Jiang W L, Gong L X, Li Y S and Liu Q Q. 2018. Remote sensing application in earthquake science research and geophysical fields exploration satellite mission in China. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(S1): 1-16 (申旭辉, 张学民, 崔静, 周新, 姜文亮, 龚丽霞, 李永生, 刘芹芹). 2018. 中国地震遥感应用研究与地球物理场探测卫星计划. *遥感学报*, 22(S1): 1-16 [DOI: 10.11834/jrs.20188337]
- Su B, Li H, Ma W Y, Jing Z, Yao Q, Cui J, Yue C and Kang C L. 2021. The outgoing longwave radiation analysis of medium and strong earthquakes. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 6962-6973 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3090777]
- Sun C Q, Yan C H, Wu X P and Xu Y J. 2014. The effect of tidal triggering on seismic fault in eastern Tibetan Plateau and its neighboring areas. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(7): 2054-2064 (孙长青, 阎春恒, 吴小平, 许亚吉). 2014. 青藏高原东部及邻区地震断层面上的潮汐应力触发效应. *地球物理学报*, 57(7): 2054-2064 [DOI: 10.6038/cjg20140703]
- Tanaka S. 2012. Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (M_w 9.1). *Geophysical Research Letters*, 39(7): L00G26 [DOI: 10.1029/2012gl051179]
- Tramutoli V. 2007. Robust satellite techniques (RST) for natural and environmental hazards monitoring and mitigation: theory and applications//*Proceedings of 2007 International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*. Leuven: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/multitemp.2007.4293057]
- Van Westen C. 2002. Remote sensing and geographic information systems for natural disaster management. *Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing*, 6: 200-222 [doi:10.1201/9780203302217.ch10]
- Wei C J. 2009. The History, Present Situation, and Future Trends of Remote Sensing Applications in Earthquake Disasters in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 13(s1):332-344 (魏成阶). 2009. 中国地震灾害遥感应用的历史、现状及发展趋势. *遥感学报*, 13(s1): 332-344 [DOI: 10.11834/jrs.20090047]
- Wu L X, Liu S J, Wu Y H and Li Y Q. 2004. Remote sensing-rock mechanics (I) - laws of thermal infrared radiation from fracturing of discontinuous jointed faults and its meanings for tectonic earthquake omens. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(1): 24-30 (吴立新, 刘善军, 吴育华, 李永强). 2004. 遥感岩石力学(I)-非连续组合断层破裂的热红外辐射规律及其构造地震前兆意义. *岩石力学与工程学报*, 23(1): 24-30 [DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.01.005]
- Wu L X, Qi K and Liu S J. 2017. Progress in analysis to remote sensed thermal abnormality with fault activity and seismogenic process. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1470-1481 (吴立新, 秦凯, 刘善军). 2017. 断裂活动及孕震过程遥感热异常分析的研究进展. *测绘学报*, 46(10): 1470-1481 [DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170347]
- Wu Q P. 1997. *Gravity and Solid Tides*. Beijing: Seismological Press (吴庆鹏). 1997. *重力学与固体潮*. 北京: 地震出版社
- Xu S R and Xu J H. 1986. The new results of seismic exploration in Huayingshan fault zone. *Acta Petroli Sinica*, 7(3): 39-48 (徐世荣, 徐锦华). 1986. 华蓥山断裂带地震勘探新成果. *石油学报*, 7(3): 39-48 [DOI: 10.7623/syxb198603006]
- Yue Y B, Chen F C and Chen G L. 2022. Statistical analysis of pre-seismic anomalies from FY-2G satellite infrared remote sensing images. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(12): 2655-2664 (乐应波, 陈福春, 陈桂林). 2022. FY-2G 卫星红外遥感图像中的震前异常统计分析. *遥感学报*, 26(12): 2655-2664 [DOI: 10.11834/jrs.20210251]
- Yi G X, Zhao M, Long F, Liang M J, Wang M M, Zhou R J and Wang S W. 2021. Characteristics of the seismic sequence and seismogenic environment of the M_s 6.0 Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2021. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(12): 4449-4461 (易桂喜, 赵敏, 龙锋, 梁明剑, 王明明, 周荣军, 王思维). 2021. 2021年9月16日四川泸县 M_s 6.0 地震序列特征及孕震构造环境. *地球物理学报*, 64(12): 4449-4461 [DOI: 10.6038/cjg202100533]
- Zhang J, Xi Q W, Yang L Z, Chen R H and Wang W X. 2007. A study on tidal force/stress triggering of strong earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(2): 448-454 (张晶, 郝钦文, 杨林章, 陈荣华, 王武星). 2007. 引潮力与潮汐应力对强震触发的研究. *地球物理学报*, 50(2): 448-454 [DOI: 10.3321/j.issn: 0001-5733.2007.02.016]
- Zhang Y, Meng Q, Wang Z, Lu X and Hu D. 2021. Temperature Variations in Multiple Air Layers before the Mw 6.2 2014 Ludian Earthquake, Yunnan, China. *Remote Sensing*, 13(5):884 [DOI.org/10.3390/rs13050884]
- Zhang Y, Kang C L, Ma W Y and Yao Q. 2016. The change of outgoing long-wave radiation before Ludian M_s 6.5 earthquake based the tidal force niche cycles. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 37(6): 68-74 (张岩, 康春丽, 马未宇, 姚琪). 2016. 基于引潮力位的云南鲁甸 M_s 6.5 地震前地面长波辐射短临变化. *地震地磁观测与研究*, 37(6): 68-74 [DOI: 10.3969/j.issn.1003-3246.2016.06.012]
- Zhou R J, Tang R C, Qian H, Wen D H, Ma S H, He Y L and Pu X H. 1997. An application of seismotectonic analogy to the Huaying-shan fault zone in East Sichuan. *Journal of Seismological Research*, 20(3): 316-322 (周荣军, 唐荣昌, 钱洪, 文德华, 马声浩, 何玉林, 蒲晓虹). 1997. 地震构造类比法的应用——以川东地区华蓥山断裂带为例. *地震研究*, 20(3): 316-322

Outgoing longwave radiation changes of the Ms6.0 Luxian earthquake based on tidal generating force

SUN Xuexia^{1,2}, CUI Jing^{1,2}, JIANG Wenliang^{1,2}, MA Weiyu³, KANG Chunli³, LI Qiang^{1,2}

1. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China;
2. Key Laboratory of Emergency Satellite Engineering and Application, Ministry of Emergency Management, Beijing 100124, China;
3. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: With the rapid development of society, the overlapping degree between the distribution of social economy and population and the impact range of earthquake disasters is gradually increasing, and the harmfulness of earthquake disasters is further highlighted. Strengthening the monitoring and prediction of earthquake disaster risk is an important means to reduce the risk of earthquake disasters. Infrared remote sensing has gradually become an important means of earthquake prediction and monitoring. On September 16, 2021, a Ms6.0 earthquake occurred in Luxian, Sichuan Province. The FY-2H surface Outgoing Longwave Radiation (OLR) data product was used to analyze the anomalous distribution and changes of OLR in the study area from August 27 to October 1. On the basis of the TFFA algorithm, our research extracted infrared radiation anomaly and made a retrospective attempt at short-term and imminent earthquake monitoring and prediction. We extracted the infrared radiation anomaly that is continuous and has remarkable change characteristics one week before the earthquake and identified the development and evolution of the impending earthquake infrared anomaly. Results showed a cross distribution between anomaly distribution and seismic structure, and the evolution process corresponds to the thermal infrared radiation law of rock fracture. In accordance with the extracted long-wave radiation anomaly, we speculate that only when the tectonic stress accumulates to the critical state of rock fracture and sliding can the tidal force trigger the earthquake, and the extracted anomaly is likely a manifestation of energy release in this process. With the change of tidal force, anomalies first appeared in the central and northeastern parts of the epicenter in the study area, and the anomalies were distributed in the northwest-southeast as a whole. This phenomenon and the evolution characteristics of rock stress-strain-fracture-experienced microfracture-fracture-accelerated fracture-fracture process are consistent. Results show that the tidal force of celestial bodies has an induced effect on the earthquake, and the anomaly of long-wave radiation may be the radiation characterization of stress and strain in the process of earthquake incubation. During extraction of seismic radiation anomaly, the selection of background day has a decisive influence on the results. This case study belongs to retrospective analysis; thus, in this study, the type of seismogenic fault is determined by the focal mechanism after the earthquake, and then the background date is determined. If this method is used for anomaly monitoring and prediction before earthquakes, the fault database can be obtained to judge the fault properties of the study area, and the background date can be selected in accordance with the fault properties. Afterward, the abnormal period (September 11-17) was tracked and verified by using NOAA satellite OLR product data; the characteristics of the two results were relatively consistent, which further demonstrated that the FY-2H satellite OLR data can be better applied to seismic anomaly monitoring. Moreover, the FY-2H single point time OLR data product has a good effect on monitoring the thermal anomaly, which further reflects the feasibility of the domestic satellite to conduct short-term and imminent earthquake prediction research. It provides a good application case for promoting the operational application of domestic satellite seismic monitoring and prediction.

Key words: remote sensing, FY-2H, short-term anomaly, Luxian earthquake, outgoing longwave radiation, tidal force

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41772219)