

马未宇,于晨,姚琪,等,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.

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

马未宇¹⁾ 于晨¹⁾ 姚琪¹⁾ 苑争一¹⁾ 崔静²⁾ 任静¹⁾

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京 100085

摘要 计算河北唐山 M_s 5.1地震过程中潮汐变化,基于该潮汐周期指示背景时间,分析本次地震过程中射出长波辐射(OLR)和遥感大气温度(AT)同步变化。结果显示,2020年7月5日~2020年7月13日,伴随引潮力由低谷向高峰连续增强变化,地震发生在引潮力相对高值时刻;伴随引潮力变化,长波辐射、大气温度经历震前平静—增强—高峰、震后快速衰减的同步变化。表明引潮力在本次地震中改变了构造内部地应力累积—失衡过程,具有触诱发地震的作用,而地面长波辐射、地表大气温度准同步变化,间接反映了本次地震地应力的变化过程。

关键词: 唐山 M_s 5.1地震 潮汐 射出长波辐射 大气温度 地震

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0367-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震是地球构造应力积累、快速释放的过程。但是,目前地应力无法及时、准确获得,Gornyy等(1988)发现中亚加兹利地震震前出现了大面积卫星热红外($10.5\sim 12.5\mu\text{m}$)辐射增强异常现象,开拓了利用卫星热红外遥感技术间接研究地震应力变化的新途径。随后各国学者对地面长波辐射(OLR, outgoing longwave radiation)、大气温度(AT, air temperature)等物理参量开展研究。刘德富等(1997)利用美国海洋及大气管理局(NOAA)提供的OLR数据资料,选取我国5个震区,采用距平算法发现强震前一个月OLR月均值增长显著,且空间上与高值区对应良好。Ouzounov等(2004, 2006, 2007)基于OLR数据运用图像差值法等综合研究与地震有关的红外现象,认为震前20天内沿主要构造断层带有明显异常演变。康春丽等(2007)针对文安地震,采用“涡度法”,提取并分析震前华北地区OLR的异常特征,认为在文安5.1级地震发生之前震中区域出现显著OLR短期异常。

自19世纪以来,学者针对地震前大气温度变化也开展了研究,发现地震前后大气温度有一定的异常响应(马宗晋等,1982),但前期由于观测能力不足,一直未能取得较大突破。

[收稿日期] 2020-07-20; [修定日期] 2020-07-28

[项目类别] 国家重点研发计划资助(2018YFC1503505)、中国地震局基本科研业务专项(ZDJ2018-18)和亚太地震二期项目“地震前兆特征的星地一体化观测研究”共同资助

[作者简介] 马未宇,男,1971年生,博士,副研究员,主要从事综合遥感应用研究。E-mail: weiyuma@163.com

崔静,通讯作者,女,1986年生,博士,副研究员,主要从事综合遥感应用研究。E-mail: jingcui_86@yahoo.com

随着震前红外遥感热异常的发现与卫星遥感技术的迅速发展以及反演能力的不断提高,地温、气温作为表征地表热信息的主要气象参量,逐步成为地震热异常识别的重要参考信息。徐秀登等(1990)针对澜沧、耿马地震,结合当时天气过程,对地表温度与地表气温地震前后时序变化进行分析,发现震前温度突发性持续上升,震后急剧下降,认为该变化与地震相关。马瑾等(2000)通过研究 1997 年玛尼 7.9 级地震前后周围地区地温场的动态演化,发现在震前 20 天阿尔金断裂的东段开始出现增温现象,然后逐渐扩展,形成了明显的条带,并一直持续到 11 月 8 日玛尼强震发生,震后此条带逐渐消失。马未宇(2008)针对汶川 8.0 级地震,选用 NCEP(美国国家环境预报中心, National Centers for Environmental Prediction)提供的地表气温资料(AT, air temperature),发现震前增温异常明显,整体表现为起始增温—加强增温—高峰增温—增温衰减—发震—再增温—余震的过程。刘军等(2014)针对九江 5.7 级地震、大姚 6.1 级地震,选用 NCEP 大气温度资料,发现震前大气热异常随高度升高异常范围扩大,增幅强度减小,表明热异常源自地面。

然而,由于缺乏明确合理的物理指征,不同学者基于不同时间尺度建立背景场,进而开展地震遥感热异常分析研究,造成结果差异性大,增温判识歧义性大(Blackett et al, 2011)。寻找具有明确物理含义的背景时间计算方法,并且符合岩石应力破裂中辐射变化规律,是提升地震红外异常在时间和空间可识别度的关键。天体引潮力与地球形变有一定的相关性,且在时间域上具有一定的指示作用。引潮力对地震构造的作用与地震活动表现出的增温异常现象,反映的都是构造运动达到一定程度发生突变,可用于计算短临地震活动发生的临界点判读。同时,以往研究大多采用单一物理参量观测,对不同物理参量间是否存在同步变化,关注较少。本文在潮汐计算分析的基础上,利用 OLR 数据和 AT 数据,对 2020 年 7 月 12 日唐山 M_s 5.1 地震开展研究。

1 构造背景

据中国地震台网正式测定,2020 年 7 月 12 日 6 时 38 分河北唐山市古冶区发生 5.1 级地震,震中位于 39.78°N , 118.44°E ,震源深度 10km。地震发生在 1976 年唐山大地震的余震区,震中以南 6km 发育有唐山断裂带。该断裂为全新世活动断裂,走向 NE,1976 年唐山地震的发震构造与该断裂带中的古冶-唐山断裂有关。在唐山市辖区断裂东侧发育有 NNW 走向的滦县-乐亭断裂以及更东侧 NE 走向的卢龙断裂。这两条断裂同样参与了 1976 年唐山地震的地震发生过程,也是全新世活动断裂(郭慧等,2011),构造分布见图 1。

2 地震过程中天体引潮力附加构造应力变化

已有研究表明,引潮力是周期性连续变化的,其在最大振幅相位时刻,有可能触诱发地应力处于临界状态的构造区发生地震(Heaton, 1975)。对本次地震,利用已有的潮汐计算方法(Zhang et al, 2018)计算 2020 年 6 月 16 日~2020 年 7 月 31 日时间范围震中位置的引潮力连续变化值,绘制如图 2 所示曲线。

图 2 显示,地震发生在 7 月 12 日(箭头所指),引潮力处于近似高值相位,显示引潮力对该地震具有一定的诱发作用。但是地震并未发生在某个转折点,表明天体引潮力瞬时变化并不会导致地震发生,应力应该是连续积累、加强的过程,因此如何判断地应力累计并达到

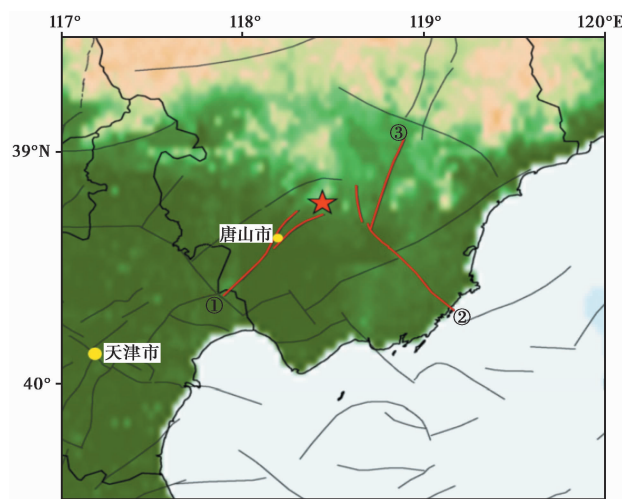
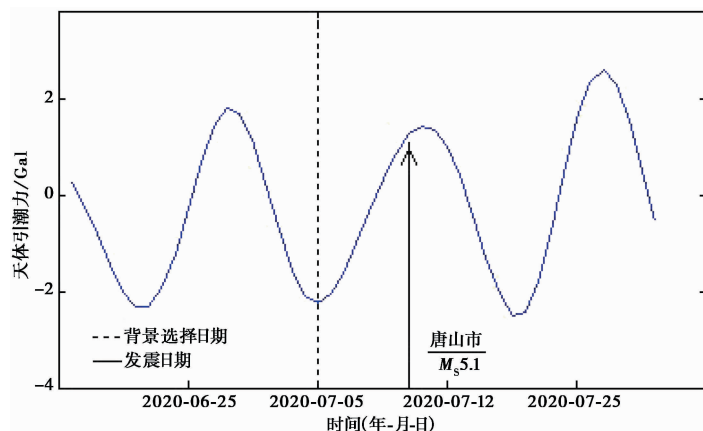


图 1 唐山地震震区构造分布

①唐山断裂带;②滦县-乐亭断裂;③卢龙断裂

图 2 2020 年 7 月 12 日河北唐山市 $M_s5.1$ 地震天体引潮力时序变化

临界状态,是一个值得思考的问题(陈荣华等,2006)。本研究基于引潮力变化周期,选取 7 月 5~13 日引潮力从低谷向高值连续变化为研究时间段,开展射出长波辐射(OLR)、大气温度(AT)逐日同步变化研究。

3 唐山 $M_s5.1$ 地震遥感热参量时空变化特征分析

为了避免由于选择处理数据时间长度(5 年、15 年、30 年)的不确定性可能带来的偏差,同时考虑到引潮力是目前唯一可预先准确计算的确定物理学参量,可为热异常研究提供明确的具有力学含义的时间指示。一方面,为获取可能与引潮力相关的地震短临遥感热异常;另一方面,通过遥感热异常可为引潮力诱发地震提供发震应力状态的监测。本文采用 Ma 等(2018)给出的潮汐背景指示的计算方法。

3.1 唐山 $M_s5.1$ 地震地面长波辐射时空变化特征分析

由于地球自身向外的辐射波段主要集中在长波波段,选择最直接反映下垫面属性、能量变化参量和大气窗口波段-射出长波辐射(OLR)数据为研究对象(刘德富等,1997);为保证数据的连续和普适性,采用美国 NOAA 系列卫星的地面射出长波辐射数据,该数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、覆盖全球共 360×181 个格点,时间分辨率为 1 天。

在本次地震中,基于引潮力变化时间周期,选择 2020 年 7 月 5 日为背景日,即引潮力变化图中周期最临近发震日的低点后的转折点,将 2020 年 7 月 6 日~7 月 13 日期间,空间范围为 ($30^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{E}$) 的地面长波辐射值与该背景日长波辐射值相减,获得地震前后 OLR 该时段逐日连续变化图像,作为本次地震临震辐射变化分析的依据(图 3)。

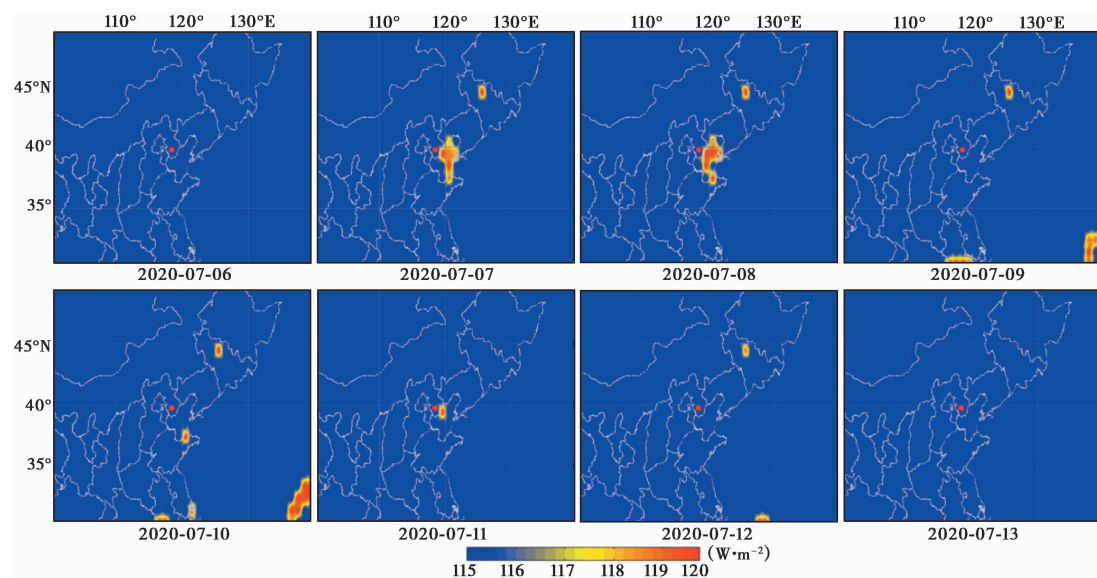


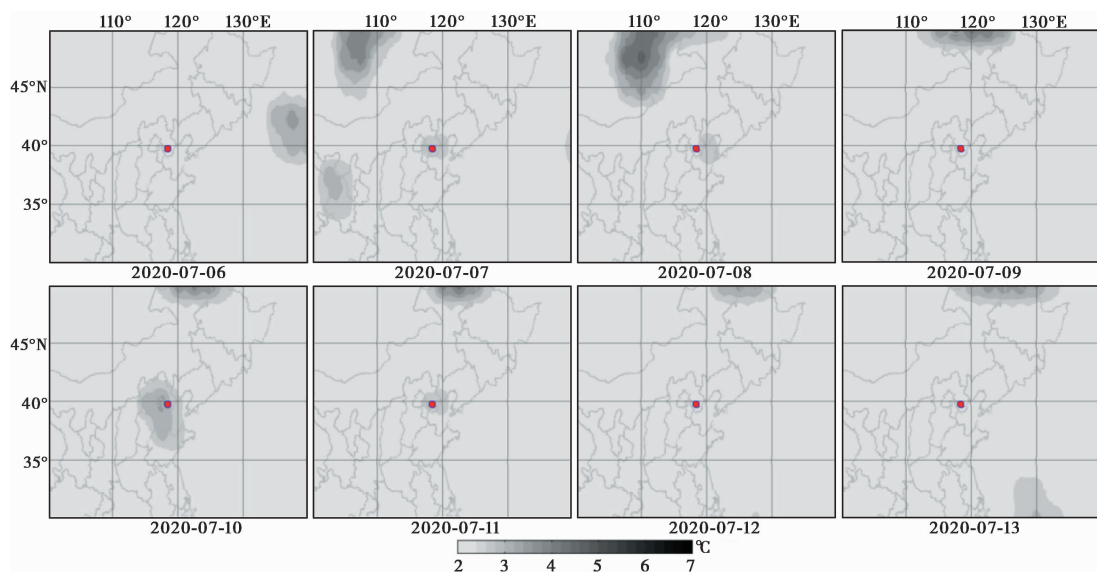
图 3 2020 年 7 月 12 日唐山 $M_s5.1$ 地震 OLR 时空演化周期

图 3 显示,在震中附近,地震前后 OLR 发生明显变化:7 月 6 日,震中附近无明显的辐射增强,7 月 7 日,震中东部出现明显的辐射增强,7 月 8 日,震中东部辐射明显扩展,增幅达到 $118\text{W}/\text{m}^2$,7 月 9~10 日,增幅衰退,并于 7 月 11 日再次出现辐射增强,7 月 12 日发生地震后,辐射增强异常快速消失。地面长波辐射演化在时间上经历了起始增强—高峰—衰减—再增强—平静的演化过程。

3.2 唐山 $M_s5.1$ 地震地表遥感大气温度时空变化特征分析

为进一步验证地震引起大气增温,采用美国 NCEP 系列提供的大气温度(AT)数据为对象研究,该数据的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、覆盖全球共 360×181 个格点,时间分辨率为 1 天。针对本次地震采用相同的研究区域、时段、数据处理算法,开展对比研究。

图 4 显示,在震中附近,地震前后大气温度发生明显变化:7 月 6 日,震中附近无明显的大气温度升高,7 月 7 日震中出现明显的气温升高,7 月 8 日在震中持续升温,幅度达到 3°C ,7 月 9 日增幅衰退,7 月 10 日,再次升温,升温幅度达到 4°C ,于 7 月 11 日微衰减,7 月 12 日发生地震后,增温快速消失,恢复震前平静。大气温度演化在时间上同样经历了起始增强—

图 4 2020 年 7 月 12 日唐山 $M_s5.1$ 地震大气温度时空演化

高峰—衰减—再增强—平静的与 OLR 相似的演化过程。

综合 OLR 和 AT 参量的演化过程,基本符合岩石受力破裂在空间上经历挤压—岩石微破裂—岩石破裂扩展—应力闭锁—破裂终止的演化特征(吴立新等,2004)。地震过程对应为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(尹祥础,1991)。

3.3 唐山地区无震时刻遥感大气温度时空变化特征分析

为进一步证实该方法的有效性,选取 2019 年震中区域无震时间段开展对比分析。首先计算震中位置相同时段潮汐变化(图 5),并依据潮汐周期开展 OLR 和 AT 的时空变化分析。假设发震时间同样为 7 月 12 日,同样选取低谷 7 月 3 日为背景,计算 2019 年 7 月 4 日~2020 年 7 月 11 日期间辐射值与该背景日的差值,依次可以得到 2019 年 OLR 和 AT 的时序变化(图 6、7)。

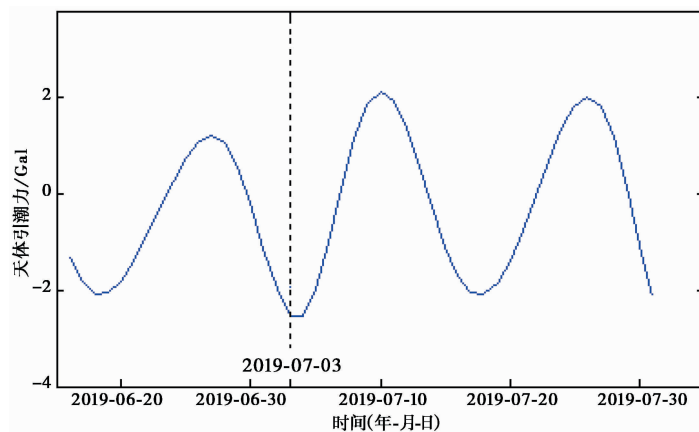


图 5 2019 年无震时间段天体引潮力时序变化

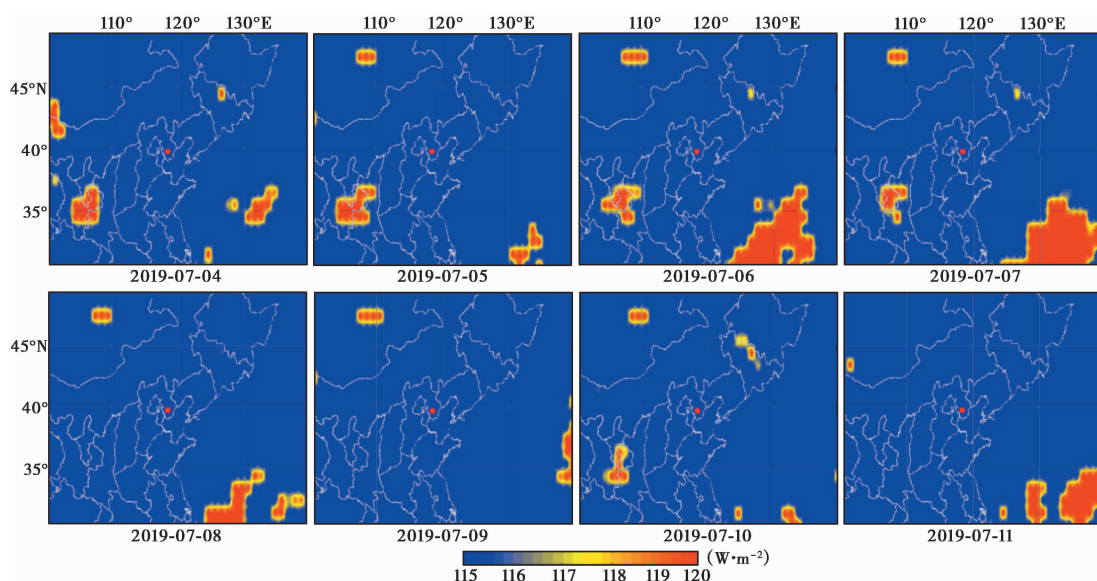


图 6 2019 无震年时间段 OLR 时序变化

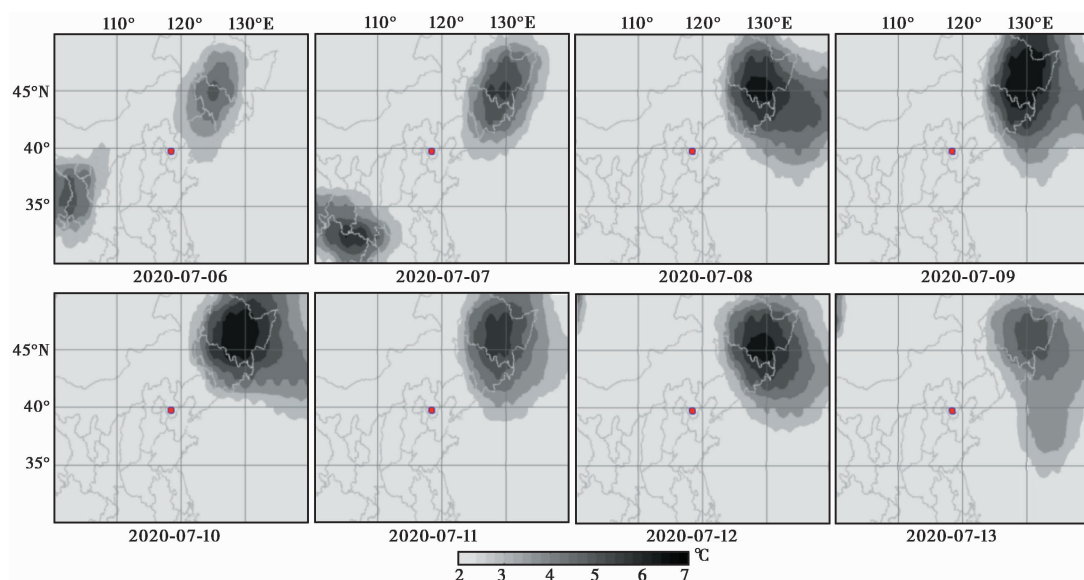


图 7 2019 年无震时间段 AT 时序变化

结果显示,2019 年无震时段,震中附近 OLR 和 AT 特征相对稳定,均未发生增强。图 6、7 中出现的异常增温是由于下垫面(地貌高程等)的差异性造成其与震中位置的潮汐周期不同,因此选用震中位置计算的周期不适用,同时异常并未表现出起始增强—高峰—衰减—再增强—平静的过程,不满足地震过程的物理机制,进一步证实该方法有效。

4 结论和讨论

基于引潮力变化获得的唐山 $M_s 5.1$ 地震前地面长波辐射(OLR)、大气温度(AT)演化过

程显示,震中附近震前 2 种热参量增强,具有明显的时间和空间可辨识度,同时二者演化过程遵循了岩石应力加载破裂过程中的热异常规律,显示热异常变化与地震存在关联。而热异常增强过程与潮汐变化具有同步性,表明引潮力在本次地震中改变了构造内部地应力累积—失衡过程,具有诱发地震的作用,而地面长波辐射(OLR)、大气温度(AT)变化间接反映了地震中地应力状态变化。开展的非震时间段对比分析,进一步证实基于引潮力变化周期获取的地震异常增温现象可以反映地震构造活动过程。

引潮力的周期变化特征不仅为遥感地震短临监测提供可预先计算、确定的震前时间背景指示,同时为震前热异常识别增加力学依据,消除由于遥感数据处理背景选择的不确定性造成遥感地震监测结论的不确定性。因此,今后要进一步结合地球构造特征研究,丰富引潮力诱震模式的物理机制模型,提高特定区域强震前的早期预测能力。

最后,本次地震震前 7 月 9 日热异常的衰减与芦山地震过程(Ma et al, 2018)相似,这一现象表征的岩石应力闭锁期,可能为地震的最终到来提供指示。

致谢: 感谢 NOAA 提供地面长波辐射(OLR)与大气温度(AT)数据以及审稿人对本文提出的建设性意见。

参考文献

- 陈荣华,薛艳,郑大林,等,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.
- 郭慧,江娃利,谢新生,2011. 对 1976 年河北唐山 $M_s 7.8$ 地震地表破裂带展布及位移特征的新认识. 地震地质, **33**(3): 506~524.
- 康春丽,王亚丽,刘德富,2007. 文安地震前华北区域长波辐射场的异常特征分析. 地震, **27**(3): 83~88.
- 刘德富,罗灼礼,彭克银,1997. 强烈地震前的 OLR 异常现象. 地震, **17**(2): 126~132.
- 刘军,刘小阳,薄海光,等,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.
- 马瑾,单新建,2000. 利用遥感技术研究断层现今活动的探索——以玛尼地震前后断层相互作用为例. 地震地质, **22**(3): 210~215.
- 马未宇,2008. 汶川地震前的 NCEP 异常现象. 科技导报, **26**(10): 37~39.
- 马宗晋,傅征祥,张珍,等,1982. 1966~1976 年中国九大地震. 北京:地震出版社.
- 吴立新,刘善军,吴育华,等,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.
- 徐秀登,强祖基,赁常基,1990. 突发性地面增温与临震前兆——以 1988 年澜沧、耿马 7.6、7.2 级地震为例. 地震地质, **12**(3): 243~250.
- 尹祥础,尹灿,1991. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用. 中国科学:B 辑, (5): 512~518.
- Blackett M, Wooster M J, Malamud B D, 2011. Exploring land surface temperature earthquake precursors: a focus on the Gujarat (India) Earthquake of 2001. Geophys Res Lett, **38**(15): L15303.
- Gornyy V I, Sal'man A G, Tronin A A, et al, 1988. Outgoing terrestrial infrared radiation as an indicator of seismic activity. Proc Acad Sci USSR, **301**(1): 67~69.
- Heaton T H, 1975. Tidal triggering of earthquakes. Geophys J Roy Astr Soc, **43**(2): 307~326.
- Ma W Y, Zhang X D, Liu J, et al, 2018. Influences of multiple layers of air temperature differences on tidal forces and tectonic stress before, during and after the Jiujiang earthquake. Remote Sens Environ, **210**: 159~165.
- Ouzounov D, Bryant N, Logan T, et al, 2006. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999~2003. Phys Chem Earth Parts A/B/C, **31**(4~9): 154~163.

- Ouzounov D, Freund F, 2004. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv Space Res*, **33** (3): 268~273.
- Ouzounov D, Liu D F, Chunli K, et al, 2007. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes. *Tectonophysics*, **431**(1~4): 211~220.
- Zhang X D, Kang C L, Ma W Y, et al, 2018. Study on thermal anomalies of earthquake process by using tidal-force and outgoing-longwave-radiation. *Therm Sci*, **22**(2): 767~776.

Temporal and Spatial Variation of Thermal Parameters from Remote Sensing Related to Tangshan $M_s5.1$ Earthquake of July 12, 2020

Ma Weiyu¹⁾ Yu Chen¹⁾ Yao Qi¹⁾ Yuan Zhengyi¹⁾ Cui Jing²⁾ Ren Jing¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) National Institute of Natural Hazards, MEMC, Beijing 100085, China

Abstract Based on the tide period indicating background time, the synchronous changes of outgoing long-wave radiation (OLR) and remote sensing atmospheric temperature (AT) during the Tangshan $M_s5.1$ earthquake in Hebei Province are analyzed. The results showed that the earthquake occurred at the time when the tidal force was relatively high and from July 5, 2020 to July 13, 2020, with the continuous increase of tidal force from the trough to the peak, the OLR and the AT experienced the synchronous changes of quiet—enhancement—peak before the earthquake and rapid attenuation after the earthquake. Our results suggested that the tidal force has changed the accumulation unbalance process of in-situ stress in the structure and has the effect of triggering earthquake. The quasi synchronous changes of OLR and AT indirectly reflected the change process of in-situ stress of the earthquake.

Keywords: Tangshan $M_s5.1$ earthquake; Tidal force; Outgoing long-wave radiation (OLR); Atmospheric temperature(AT); Earthquake