

2016 年 3 月 21 日甘肃金塔 4.7 级地震 热红外亮温异常分析^①

张 璇¹, 张元生^{1,2}, 田 洁¹, 张俏丽¹

(1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000; 2.中国地震局地震预测研究所兰州创新基地,甘肃 兰州 730000)

摘要:使用中国静止气象卫星 FY-2E/G 红外遥感亮温产品为基础数据,针对 2016 年 3 月 21 日甘肃金塔 4.7 级地震前后出现在震中区附近的显著热红外异常,运用小波变换和相对功率谱法进行异常提取和资料分析,结果表明,地震热红外异常范围主要分布在震中以北的大范围区域,震前 10 天左右出现功率谱增强现象,随着时间推移,异常范围逐渐向北扩大,一直持续到震时,震后 14 天异常开始收缩并减弱。通过对比同地区相似震例发现,本次地震与 2012 年 5 月 3 日金塔 5.4 级地震的热异常特征有许多共同点,其中相同的特征周期可为热红外地震前兆特征的归纳提供典型的参考信息,同时可为建立区域热异常统计模型积累可靠的判定依据。

关键词: 金塔 4.7 级地震; 热红外亮温; 相对功率谱; 类比分析

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)增刊 2-0212-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.Supp.2.0212

Analysis of Thermal Infrared Anomaly in Gansu Jingtá $M_s4.7$ Earthquake on March 21, 2016

ZHANG Xuan¹, ZHANG Yuan-Sheng^{1,2}, TIAN Jie¹, ZHANG Qiao-Li¹

(1.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu China;

2.Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, Gansu China)

Abstract: Aim at the thermal infrared anomaly in Gansu Jingtá $M_s4.7$ earthquake on March 21, 2016, this paper collected the infrared remote sensing brightness temperature data of China Geostationary Meteorological satellite FY-2E/G, and analyzed the data by using wavelet transform and relative power spectrum transform method. The results showed that the thermal infrared anomaly was distributed in the north area of epicenter, and the power spectrum enhanced 10 days before the earthquake. With the passage of time, the anomaly range gradually expanded northward until the occurring of the earthquake, which shank and weakened 14 days after the earthquake. The spatial distribution of thermal anomaly showed a strip intersection of north-south and North East direction, which is consistent with the previous statistics results. The thermal anomaly duration of this earthquake is only about 20 days, and its characteristic period is 21 days. By comparison with the similar case in this area, we found that the thermal infrared characteristics of this earthquake had some common points with that of Jingtá M_s 5.4 earthquake on May 3, 2012, which mainly manifested in the following three aspects: (1) there was prominent thermal reac-

① 收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 兰州地球物理国家野外科学观测研究站开放基金(2014Y01)

作者简介: 张 璇(1985—), 女(汉族), 甘肃天水人, 助理研究员, 主要从事地震卫星应用研究。E-mail: zhangx198565@126.com。

通信作者: 张元生(1965—), 男(汉族), 贵州湄潭人, 研究员, 主要从事卫星遥感应用与地震学方面的研究工作。

E-mail: zhangys@gsdzj.gov.cn。

tion before the two earthquakes; (2) the characteristic periods of the two earthquakes were both 21 days, but due to the impact of the earthquake magnitude, their thermal anomaly duration was slightly different; (3) the epicenters were both located near the fault which is at the edge of the anomaly concentrated area, or the intersection of the two thermal strips. The same characteristic periods can provide reference information for the induction of thermal infrared seismic precursor characteristics, and can also provide a reliable basis for the establishment of statistical model of regional thermal anomaly. The difference of the two cases mainly manifested in the maximum peak and anomaly range. These two earthquakes were from the same area, thereby reducing the effect caused by the different geological conditions, coupled with the similar occurrence time which reduced the interference caused by climate factors, so the different magnitude is the main reason for the difference of maximum peak and anomaly range.

Key words: Jingtá $M_s4.7$ earthquake; infrared remote sensing; relative power spectrum; analogical analysis

0 引言

2016 年 3 月 21 日 11 时 29 分甘肃省酒泉市金塔县发生 $M_s4.7$ 地震,据中国地震台网中心测定,震中位于 $40.27^\circ \text{N}, 98.22^\circ \text{E}$,震源深度为 20 km。该次地震震中距离酒泉市区 65 km,嘉峪关市区和酒泉市区均有明显震感,地震并未造成人员伤亡。考虑该地区 2012 年 5 月 3 日曾发生过 $M_s5.4$ 地震,笔者利用热红外亮温长期数据,使用小波变换及相对功率谱法,对本次地震震前已发现并追踪的热异常进行处理,通过类比两次地震的时空演化过程及相对变化率,提取该地区热异常的时空表现特征,总结区域性的地震热红外预报判定依据。

自上世纪 80 年代以来,大量学者开始利用卫星热红外遥感数据研究热信息与地震的关系,并取得了一定进展^[1-11]。早期卫星热红外资料用于地震前兆信息提取,大多以对红外原始图像的直观分析进行推断,具有一定的经验性,即对研究者的理论知识背景和图像识别能力要求较高。近年来,随着越来越多数学处理方法的尝试和应用,热红外前兆异常识别过程中的干扰因素得以更好的排除,热异常特征的提取也更加精准化。陈顺云等^[12]运用小波理论综合分析地表热红外辐射,结果表明,低频成分的热异常更接近于断层活动所引起的热信息,该成分的高温异常区跟构造特征、地震活动密切相关。熊攀等^[13]运用小波极大值图示法、小波系数叠加法、小波分解综合分析法和小波赫斯特指数法分析和处理长波辐射数据,并结合汶川地震和普洱地震资料发现,NOAA 卫星长波辐射数据在汶川地震前震中 300 km 范围内均出现明显的地震异常,在普洱地震前出现三个非周期性、不连续、孤立变化的异常特

征,前者地震强度和影响区域大于后者。张元生等^[14]应用不同于以前的卫星遥感资料处理方法,对 2008 年汶川 8.0 级特大地震进行了再研究,结果表明,在大地震发生前亮温变化存在明显的周期和振幅并伴有大范围的热异常分布区域。该热异常提取方法依次应用小波变换、功率谱法及相对处理法进行计算,可以有效地去除非震因素,提取真正与地震相关的热辐射异常信息,对处理原始图像前兆异常不甚明了的震例是行之有效的。本文应用上述数学计算方法,针对金塔 4.7 级地震前后震中区的热红外亮温图像进行分析,研究此次地震红外辐射的表现特征,同时对比同地区相似震例的亮温变化,希望研究结果能为识别该区域范围热红外前兆信息提供一些定性的参量,为开展地震热红外监测预测工作提供更多的震例支持。

1 地震概况和数据来源

金塔 $M_s4.7$ 地震发生在甘肃北山地区,该地区地质调查和探槽开挖结果未曾发现有断层新活动的迹象^[15]。从震源机制来看,本次地震主要表现为走滑型,与其南部的金塔-花海盆地南缘断裂的断层性质明显不相符,该发震区域未看到明确的断层出露,野外科考的结果初步判定为弥散型地震。本次地震的热红外前兆异常已于震前的日常跟踪工作中有所发现,震后也进行了相应的数据整理和归纳分析,研究结果可为今后应用热红外遥感技术进行地震预报预测工作提供更多资料和依据。

笔者使用中国静止气象卫星 FY-2E/G 的红外遥感亮温产品为基础数据(数据来源于中国气象局国家卫星气象中心),FY-2E 和 FY-2G 分别发射于

2008年6月15日和2014年12月31日,均定点于东经105°赤道上空,距离地面约35 000 km,星下点分辨率为5 km,E星和G星的有效观测范围为60°N~60°S,45°E~165°E,可间隔30 min或1 h对地球观测一次,每天至少有24个数据产出。热红外亮温数据来自卫星通道红外1,即波段10.3~11.3 μm 。考虑数据的海量性,笔者选择地理范围5°~50°N、55°~150°E以内的数据,选取2010年1月1日—2016年4月17日为研究时间长度。为减少太阳辐射带来的影响,本文仅截取北京时间1:00—5:00的多个时次的观测数据,用补窗法(按照观测质量,考虑云干扰值为下限、错值及不符合黑体辐射公式的高值为上限进行剔除,所得数据计算均值)计算亮温日值,并建立原始数据库。

2 分析方法及处理流程

2.1 小波变换

由于热红外亮温图像反映的地表目标信息往往偏大,并伴有“热”假象的存在,从中寻找到真正与地震前兆相关的热信息并非一件易事。亮温数据中不仅包括如地球基本场、年变温度场及构造活动变化等长周期成份,还受到日变温度场、短时云雨和寒热气流等短周期因素的干扰,如何在不损失分各周期成份的前提下进行有效分解是亮温数据处理中的关键环节,而近年来广泛应用于数字信号处理的小波变化法或可实现此目的。小波变换可进行时频局部性质分析,能将交织在一起的不同频率成分组成的复杂时间序列分解为各种频率的子序列。本文采用Daubechies小波系中的db8小波基对亮温数据进行小波变换处理,具体过程相当于采取了一个带通滤波,即首先舍去小波7阶的低通部分,以此消除地球基本温度场、年变温度场和地形的影响;而后舍去小波2阶的高通部分,就可剔除气象因素引起的短周期干扰;最后用2阶低通部分减去7阶低通部分即可得到在时间域里表现为正负相间的热红外亮温数据,该数据特征周期范围中正包含着研究所需的地震短临异常信息。

2.2 傅里叶变换及相对处理

绝大多数地球物理现象均在理论上表现出频率依赖的形式,因此信号的频谱分析是提取信号特性的一种重要手段。对于确定性信号,傅里叶变换可以把信号从时间域变换到频率域,进而研究它的频谱结构和变化规律。在实际应用中,通常只能采集到平稳随机信号中的有限个数据,因而采用功率谱

估计来获得原始信号的真实频率。对于存储量很大且处理程度较难的亮温数据,文中采用功率谱估计来研究其在金塔地震前后的功率谱有何异同。考虑多数地震中热红外短临异常持续的时间一般在10~90 d,故以 n ($n=64,128$,本文中 $n=64$)天为窗长, m ($m=1,2,3,4,5$,本文中 $m=1$)天为滑动窗长作傅里叶变换。由于地震前的热异常期通常大于10 d,为了不影响数据计算速率,笔者仅进行了6个频段的计算,这样得到的特征周期分别为64 d、32 d、21 d、16 d、13 d和11 d。其次,为了去除地形和海拔对观测值的影响,更好反映其在地震前后的功率谱变化,本文对每一像元的所有功率谱做相对处理。具体计算过程如下公式所示:

$$A_{ik} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l W_{ijk}, (i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

$$R_{ijk} = \frac{W_{ijk}}{A_{ik}}, (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,l; k=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

其中: W_{ijk} 为第 i 个像元第 j 天在第 k 频段的功率谱幅值; A_{ik} 为第 i 个像元第 k 频段在 l 时长内的平均功率谱幅值; n 为象元总数量; m 为频率点数量; l 为时间序列总数目,通过式(2)计算可得到 R_{ijk} ,即第 i 个像元第 j 天在第 k 频段的功率谱相对变化幅值。最后,应用图像处理技术对上述计算获得的时频空间数据进行全时空和全频段扫描,提取相对变化率较大的频段图像,再根据时空演化图和时序曲线图确定异常区域和辐射强度,进一步判断和分析可能的发震区域及异常变化特征。

3 数据处理结果

3.1 金塔地震前后热红外异常变化特征

2016年3月21日甘肃金塔 $M_s4.7$ 地震发震区域地质构造尚不明确,但此次地震震前出现在震中附近的大面积热红外异常十分显著。根据对时频功率谱空间数据进行扫描获得地震前后红外亮温图像发现,本次地震热异常范围主要分布于震中以北的甘肃和内蒙古交界区,时空演化过程如下(图1):震前10天左右开始出现功率谱增强现象,异常范围随着时间推移逐渐向北扩大,至发震日扩大趋势仍在持续,震后6天(即3月27日)热异常增强现象达到极值,相对变化率达到12倍以上(图2)。本次地震热异常演化过程同以往震例类似,均表现为由初始增温至加速发展的过程,至震后14天(即4月4日)

功率谱信息开始急速减弱。而热异常空间分布也符合震例统计结果,呈现出近南北方向和北东方向的条带交汇状,即“V”型分布特征,震中恰位于两条带

在异常迁移过程中形成的交汇带附近。因受震级大小影响,本次地震热异常持续时间仅在 20 天左右,特征周期为 21 天。

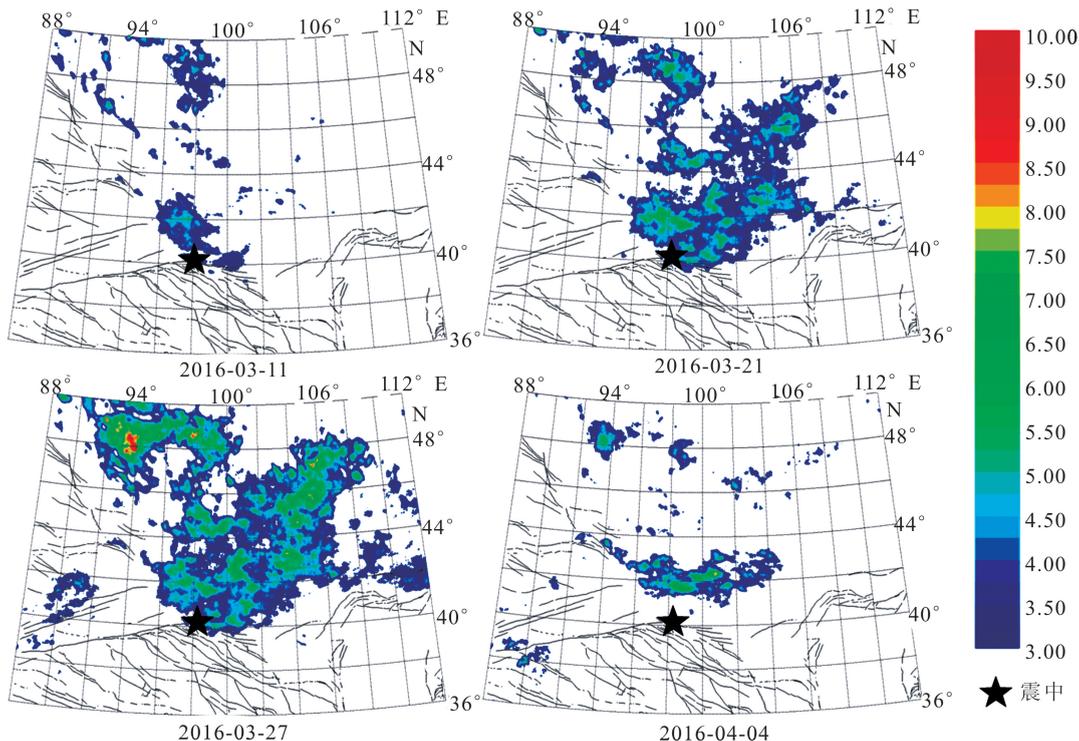


图 1 金塔 4.7 级地震热红外相对功率谱时空演化图

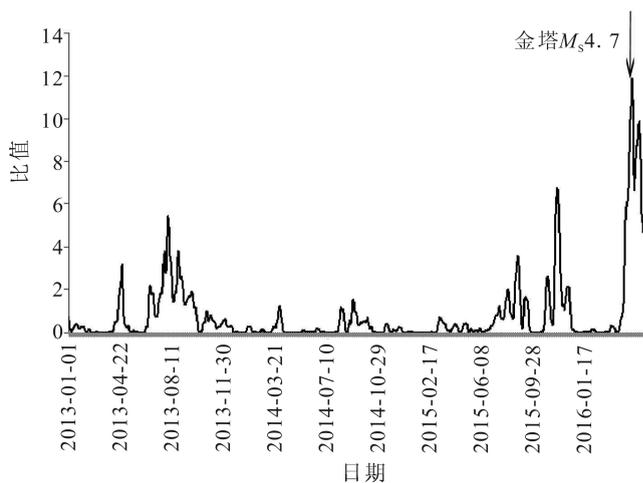


图 2 金塔 4.7 级地震异常区平均谱值时序曲线

3.2 同地区地震类比分析

地震热红外异常的研究目的在于探索异常的时空演化特征及其与地质构造环境的内在联系,进而为地震的短临预报提供依据^[15]。热红外震例积累及类比工作可为正确识别与地震或断层活动相关的热信息提出更多判别指标,更大程度地排除非震因素引起的亮温变化。考虑发震区域及时间尺度,本文选择 2012 年 5 月 3 日甘肃金塔 M_s 5.4 地震与本

次地震作类比分析,并采用相同的数据处理方法和流程。两次地震震中相距不足 50 km,通过使用时频相对功率谱法对其进行局部扫描可观察到(图 3),2012 年 3 月初出现热红外异常,主要集中在震中区西南方向,异常持续扩张至 4 月底,热辐射强度于 4 月 24 日达到峰值,随后快速减弱直至完全消失,热异常持续时间在 70 天以上,特征周期同为 21 天,震中始终位于异常辐射最强区边缘的凹陷部位,总体演化过程与金塔 M_s 4.7 地震基本一致,不同的是地震发生在异常增强至峰值后的第 9 天。对 2010 年 1 月 1 日—2013 年 12 月 31 日期间异常区平均谱相对值时序曲线的分析表明(图 4),该次地震异常区特征功率谱幅值最高达到平均值的 19 倍以上,辐射强度明显高于 2016 年的金塔 M_s 4.7 地震。

相同地区的震例进行类比可以有效的排除地质环境、大气环境和地理位置等条件带来的干扰,对提高区域热红外异常预报指标的可信度有一定帮助。这两次地震由于震中位置相近,热异常表现出许多共同点:首先,地震发生前均存在突出的热反映;第二,受震级大小影响,在异常持续时间上虽有所差

异,但特征周期同为 21 d;最后,震中位置都符合以往震例统计的结果,即在异常最集中区域边缘的断

层附近,或是两组热条带的交汇部位。上述共同点或可为该区域热红外前兆信息的判定提供一些明确

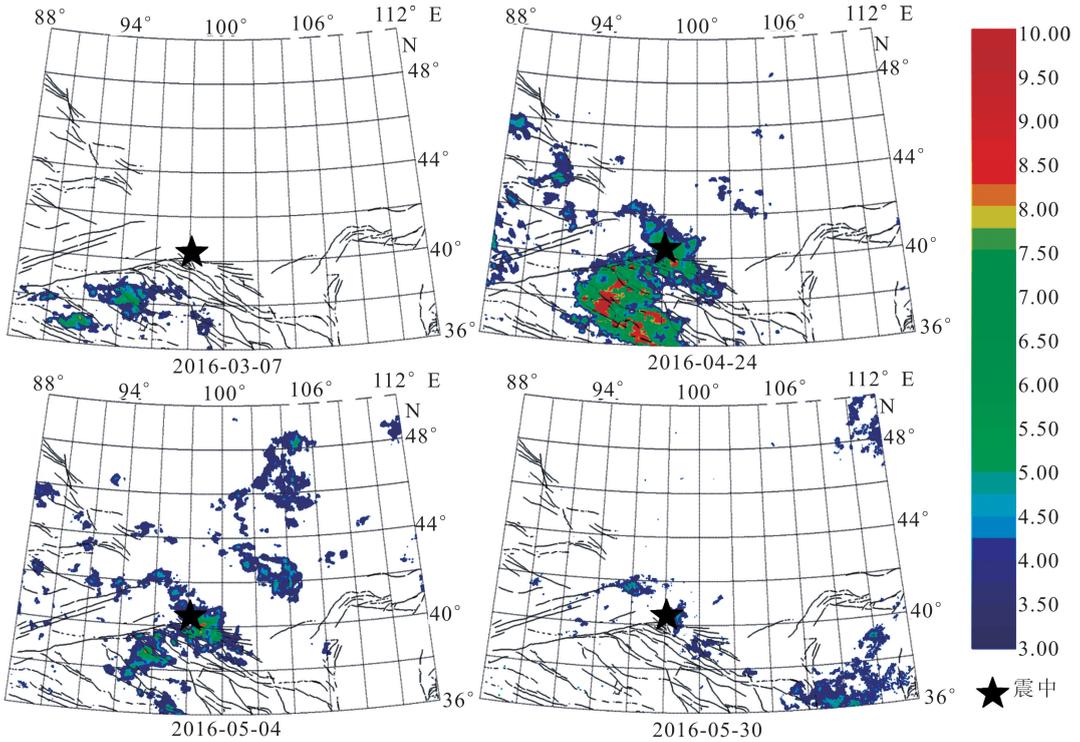


图3 金塔 5.4 级地震热红外相对功率谱时空演化图

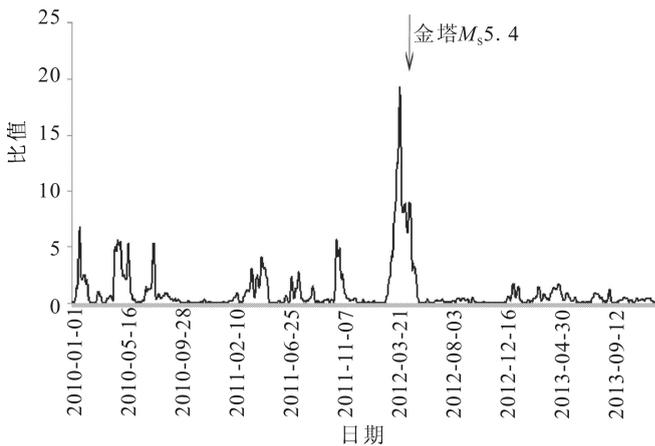


图4 金塔 5.4 级地震异常区平均谱值时序曲线

的指标,特别是相同的特征周期,可表征本地区的一种固定的物理特性。通过比较发现,两者的不同点主要表现在最大峰值和异常范围,其中最大峰值同时受震级大小和各种地质环境变化的控制,由于文中对比的地震来自同一地区,因而降低了不同地质条件造成的影响,加之两者发震时段所处的季节较为相近,也减少了气候因素带来的干扰,所以震级大小的差别是最大峰值显示出差异的最主要原因。两次地震的异常范围分别位于震中区的东北和西南方向,该覆盖区域在忽略地区气候及水汽影响的条

件下,主要的控制因素考虑为地震前后应力变化大小和方式的不同,震前至震时地壳应力会持续增大,或由于地下岩层破裂方式的不同,导致地下贯穿至地表的裂隙向不同方向增多,从而出现异常范围截然不同的情况。目前,热红外在地震方面的应用尚处于震例总结和实践检验阶段,本文研究中对比的相似和不同之处还存在许多推测结论,还需进一步结合地质科考和实验研究的结果,使同地区热异常的预测指标更加可信。

4 结论与讨论

本文以静止卫星连续亮温资料为数据源,针对 2016 年 3 月 21 日发生在甘肃金塔的 4.7 级地震进行亮温数据计算处理和同地区震例对比研究。结果表明,金塔 4.7 级和 5.4 级地震前均出现了较明显的热红外功率谱信息增强变化。这两次同地区地震的热异常演化特征有许多相同点,主要表现在特征周期、异常与震中位置的关系上,考虑其发震时段及迁移特征,可判定两次地震的热异常均符合“地球温室效应-大气耦合”的成因机理。金塔 5.4 级地震热增强现象的持续时间明显长于金塔 4.7 级地震,同时相对变化率的峰值也有所不同,排除区域地质环境

和气象因素的干扰,可确定为地震前后能量释放的差别造成的。对两次地震热红外异常的覆盖范围和强度进行对比,热辐射逼近极值时二者有一定差异,尤其表现在异常区域的出现和迁移方向上,主要原因可能与两次地震前应力积累及释放的方向相关,同时地震震级大小的差距也是辐射强度不同的直接影响因素。从比较结果来看,两次地震有一致的特征周期,该参量或可为热红外地震前兆特征的归纳提供典型的参考信息,为未来建立区域热异常统计模型积累可靠的判定依据。

从以往地震热红外震例归纳总结的结果来看,通常5.5级以上地震发生前才会出现明显的热反映,本文研究的两次金塔地震震级与热异常震级响应均相差一定数量,但均在震前追踪到清晰可辨的热异常区域,或许说明热辐射变化本身在地域敏感程度上存在一些差别。由于地物本身的热过程相当复杂,大气对热辐射的吸收、散射及再辐射,地表层的热状况都会对其造成干扰,已有的研究结果也表明,地震热辐射特征周期受地理和气候环境红外的影响^[17],主要表现为干湿地区较大的差异性。金塔地处中国西北部,北接广阔沙漠,常年干旱少雨,日照时间较长,属于典型的半沙漠干旱型气候,或许正是该地区深处大陆内部,降水稀少,蒸发旺盛,加之邻近的酒泉西部盆地富含油气的特殊地理条件,造成这两次地震热红外异常现象显著。震前由于地壳应力的持续增大,地下贯穿至地表的裂隙陡然增多,导致地球放气—温室效应的发生,金塔地区受日照条件及地下油气储备量的影响,致使地下逸出气体量猛然增大,出现热效应被放大的现象,因而震前就看到异常面积相对较大的热红外图像。目前,由于对地震热红外震兆成因认识不完善,对于上述特殊地质环境、气候条件引起的热红外非典型异常变化还有一定的经验性推测,日后仍需不断调整和不断改进数据处理方法,以提升对热异常判定的精准度,提高热红外地震时空强预测的准确性和成功率。

致谢:感谢中国气象局国家卫星气象中心提供了部分静止卫星数据资料。

参考文献

- [1] Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. Impending-earthquake Satellite Thermal Infrared and Ground Temperature Increase Anomalies[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36: 1894-1900.
- [2] 徐秀登,徐向民,马升灯,等. 临震大气增温异常成因的初步认识[J]. 地震学报, 1995, 17(1): 123-127.
- [3] 强祖基, 侯常恭. 卫星热红外图像亮温异常—短临震兆[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28: 564-573.
- [4] 刘德富, 彭克银, 刘维贺, 等. 地震有“热征兆”[J]. 地震学报, 1999, 21(6): 652-656.
- [5] 张元生, 沈文荣, 徐辉. 新青 8.1 级地震前卫星热红外异常[J]. 西北地震学报, 2002, 24(1): 1-4.
- [6] 马瑾, 单新建. 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[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 210-215.
- [7] Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A. Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Japan and China[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 33: 519-534.
- [8] 郭卫英, 单新建, 屈春燕. 塔里木盆地红外增温现象与地震关系的初步探讨[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 736-741.
- [9] Saraf A K, Rawat P, et al. Satellite Detection of Earthquake Thermal Infrared Precursors in Lran [J]. Nature Hazard, 2008, 47(1): 119-135.
- [10] 邓志辉, 王煜, 陈梅花, 等. 中国大陆几次强地震活动的卫星热红外异常分析[J]. 地震地质, 2003, 25(2): 327-337.
- [11] 张璇, 张元生, 魏从信, 等. 四川芦山 7.0 级地震卫星热红外异常解析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 272-277.
- [12] 陈顺云, 刘培润, 刘立强, 等. 地表热红外辐射的小波分析及其在现今构造活动研究中的意义[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 824-830.
- [13] 熊攀. 小波方法在地震遥感信息提取中的应用[D]. 武汉: 中国地震局地震预测研究所, 2009: 1-92.
- [14] 张元生, 郭晓, 钟美娇, 等. 汶川地震卫星热红外亮温变化[J]. 科学通报, 2010, 55(10): 904-910.
- [15] 何文贵, 袁道阳, 王爱国, 等. 2012 年甘肃金塔 M_s 5.4 地震发震构造讨论[C]//第六届构造地质与地球动力学学术研讨会. 122-123.
- [16] 屈春燕, 单新建, 马瑾. 地震活动性热红外异常提取方法研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 699-705.
- [17] 魏从信. 地震热辐射研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2011: 1-87.