

强震中波红外异常特征研究^①

张丽峰¹, 郭 晓^{1,2}, 张 璇^{1,2}, 魏从信^{1,2}, 秦满忠^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为了研究强震中波红外热辐射异常变化特征,以风云卫星中波红外资料为基础数据,应用小波变换和功率谱估计方法对 6 次 6.5~7.0 级强震进行分析。结果表明:6 次强震前 3 个月内均存在明显的中波红异常变化,功率谱异常偏离年均值和标准差值较大,其异常幅度可达 8 倍,持续时间为 50~105 天。异常变化特征具有强震短期预测指标意义,同时可对即将投入实用的高分辨率静止卫星中波红外资料在地震预测中的应用提供重要参考。

关键词: 强震; 中波红外; 异常特征

中图分类号: P315.73; TN219

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)06-0977-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.04.0977

Anomaly Characteristics of Medium-wave Infrared Data prior to Strong Earthquakes

ZHANG Li-feng¹, GUO Xiao^{1,2}, ZHANG Xuan^{1,2}, WEI Cong-xin^{1,2}, QIN Man-zhong^{1,2}

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

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this study, we investigated the medium-wave infrared anomaly characteristics prior to the occurrence of strong earthquakes. We use wavelet transformation and relative power spectrum estimation methods to analyze medium-wave infrared data from an FY stationary meteorological satellite prior to the occurrence of six strong earthquakes with magnitudes of 6.5~7.0. The results show that obvious medium-wave infrared anomalies occurred within three months of the six strong earthquakes. In addition, the relative power spectrum value greatly deviated from the annual average and standard deviation in a 50~105 day period. The anomalies of the Xinyuan-Hejing and Lushan earthquakes appeared in a brief period prior to the two earthquakes and continued until they had stopped. In the brief period before the earthquakes, the power spectrum anomaly values increased by a factor of more than eight. The main evolution and peak of the anomalies of the remaining four earthquakes all appeared prior to the earthquakes and their power spectrum anomaly values also increased by a factor of more than eight. The corresponding areas where the anomaly values reached their peaks ranged from several thousands to tens of thousands of square kilometers, and the corresponding periods ranged from 11 to 32 days. The relative power spectrum value deviates from the annual average and standard deviation and the period of deviation is more than 50 days. All these characteristics can be easily recognized and used to expediently predict earthquakes. Moreover, the use of high-resolution medium-wave infrared data

① 收稿日期: 2016-05-08

基金项目: 高分遥感地震监测与应急应用示范系统(一期)(31~Y30B09~9001~13/15)

作者简介: 张丽峰(1989-), 女, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为地震红外异常研究。E-mail: ZhangLFng@163.com。

from key earthquake hazardous areas can provide a reference for seismic prediction.

Key words: strong earthquakes; medium-wave infrared; anomaly characteristics

0 引言

随着卫星遥感技术的发展,20世纪80年代前苏联科研人员首先注意到卫星热红外遥感信息与地震之间存在着某种联系^[1]。近二十年来,国内外地震工作者开展了卫星遥感地震典型震例分析^[2-6]、异常信息提取方法^[7-8]和地震红外异常机理^[9-10]等方面的研究,取得了不少有意义的研究结果,为进一步推动卫星遥感在地震预测预报中的应用研究打下了坚实的基础。特别是近几年来地震异常信息提取方法研究取得了较大进展,其主要有效率谱相对变化法、涡度背景场法和断裂带内外温差法等^[11]。荆凤等^[12]应用涡度背景场法在研究中强震长波辐射异常时发现震前40余天到几天均出现了不同程度长波辐射异常,这些可能与地震有关,但其异常幅度与震级不是简单的线性关系。张元生等^[13]用热红外资料对2008年以来汶川 $M_s 8.0$ 等3次地震进行研究,发现震震区域位于异常区边缘或异常区内的活动断层上,震震时间位于最大特征幅值之后的35天内。郭晓等^[14]研究了6次强震长波辐射异常并提出“功率谱相对变化法”,结果表明大震之前存在明显的长波辐射功率谱异常,其提取了容易识别及方便应用的热辐射功率谱信息极值、功率谱增强持续时间等异常特征指标。此外,卫星遥感资料具有覆盖范围大、连续性、重复性和能够实时更新等特点,可获得大区域的与震情跟踪监视有关的测项数据,如地表辐射场动态变化的图像,其结果可应用于有关省地震局年中与年底地震会商中。

上述研究主要运用了卫星远红外和长波辐射资料,而中波红外资料对高温物体非常敏感,常用于检测资料覆盖区内的火山爆发状况和大面积的火灾情况,其在地震中的应用研究尚处于起步阶段。郭晓等^[15-16]利用静止卫星中波红外资料对2008年以来汶川、于田等大地震进行初步研究,结果表明震前均存在较明显的短临热辐射异常现象。为进一步研究强震中波红外热辐射异常变化特征,同时为高分辨率对地观测重大专项中高分4、5号静止卫星携带的中波红外波段资料应用于地震预测预报提供参考,本文以风云静止卫星中波红外资料为数据基础,应用小波变换和功率谱计算数据处理方法对有资料覆盖的6次6.5~7.0级强震进行分析研究。

1 数据获取

所用数据来源于风云二号静止气象卫星FY-2C、FY-2E、FY-2G(数据下载网址:<http://fy3.satellite.cma.gov.cn/PortalSite/Data/Satellite.aspx>)。FY-2C于2004年10月19日发射(FY-2E星为FY-2C的替代星于2008年6月15日发射,FY-2G星为FY-2E的替代星于2014年12月31日发射),定点于 105°E 赤道上空离地面35000多km处,有效观测范围为 $45^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$, $60^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 。FY-2C/FY-2E/FY-2G卫星主要有效载荷为可见光和红外自旋扫描辐射计VISSR(Visible and infrared Spin Scan Radiometer),其通道标识IR1为长波红外通道,波段范围为 $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$;通道标识IR2为红外分裂窗,波段范围为 $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$;通道标识IR3为水汽通道,波段范围为 $6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$;通道标识IR4为中波红外通道,波段范围为 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 。

风云静止气象卫星每天至少观测24次,正常观测时间间隔为1h,加密观测时间间隔为30min。观测数据通过“静止气象卫星云图接收处理系统”处理后形成可二次开发的亮温产品文件,并以HDF格式存储。选择每日世界时(GMT)15:00~20:00(即北京时间23:00到次日凌晨4:00)的多时次观测数据以减少太阳辐射的影响,通过自编程序整理成区域 $5^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $55^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 内间隔纬度 0.05° 、经度 0.05° 顺序存储的二进制文件(1个观测时次为一个文件),再对区域内每日多时次观测数据文件计算其平均值构成亮温日值以去除部分云层影响。FY-2C卫星的有效数据起始时间为2005年7月1日,本文获取的数据处理起止时间为2006年1月1日—2015年12月31日。

2 数据处理方法

获取的HDF格式数据经过处理生成 $5^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $55^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 区域内间隔纬度 0.05° 、经度 0.05° 顺序存储的二进制文件(1年为一个数据文件),截止2015年12月31日共有10年数据。这10年的中波红外亮温数据中包含地球基本温度场、年变、日变、云雨和极端气象现象、构造活动(如地震)、地形地貌和植被等各种影响因素引起的温度变化信息。从频率域看,诸多影响因素具有不同的频率^[17],如

日变、云雨和极端气流现象引起的温度变化时间较短,一般为几小时至几天,而地球基本温度场和年变温度场则属于长周期成分。采用 Daubecheies (dbN)小波系中的 db8 小波基对中波红外亮温资料进行小波变换处理,并对其进行功率谱计算和相对处理,最后生成时频相对功率谱空间数据。具体的中波红外亮温资料小波变换、功率谱计算和相对处理过程在文献[14-15]中有较详细地叙述,在此不再赘述。到目前为止,已积累了 10 年的完整数据,以区域大小为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 范围为例,计算区域相对功率谱时序值、年均值和标准差。

时序值计算式为

$$\overline{\omega}_i = \frac{\sum_{j=1}^{121} \omega_{ij}}{121} \quad (1 \leq i \leq 365) \quad (1)$$

式中: ω_{ij} 为小区域第 i 天第 j 个像元的相对功率谱值。

年均值计算式为

$$\overline{A}_i = \frac{\sum_{k=1}^{10} \sum_{j=1}^{121} \omega_{ijk}}{1210} \quad (1 \leq i \leq 365) \quad (2)$$

式中: ω_{ijk} 为小区域第 k 年(2006—2015)的第 i 天第 j 个像元的相对功率谱值。

标准差计算式为

$$B_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} \sum_{j=1}^{121} (\omega_{ijk} - \overline{A}_i)^2}{1210}} \quad (1 \leq i \leq 365) \quad (3)$$

式中: ω_{ijk} 同式(2)。式(2)和(3)不考虑闰年的情况。

3 震例分析及结果

(1) 2012 年 6 月 30 日新疆新源—和静发生 $M_s 6.6$ 地震,该地震是塔里木块体在 NNE 方向力的作用下,伊犁盆地北缘断裂发生右旋走滑逆冲破裂所致,其发震构造是伊犁盆地北缘断裂^[18]。此次地震前后的中波红外相对功率谱异常主要分布在塔里木盆地(图 1)。具体过程为:6 月初异常稀疏地散布于整个塔里木盆地,幅度小;随时间推移,其幅度和面积不断增大,分布形态与塔里木盆地相似且其边界与断层相关,异常东南边缘以阿尔金断裂为界并与其走向一致,北部以库姆格列木断裂和哈桑托开断裂为边界,西部以安大力克断裂和奥兹格尔他乌断裂为边界;随后异常逐渐减弱,7 月 20 日前后主要集中在震中以南的小区域内,到 8 月中旬异常

零星地分布在震中南部与北部。该地震达异常峰值时大于 8 倍的面积约为 6 万 km^2 ,功率谱的对应周期为 11 天。其时序曲线[图 2(a)]显示,小区域地震当年时序曲线在震前 26 天(即 2012 年 6 月 4 日)开始偏离年均值和标准差曲线,震后 16 天(即 7 月 16 日)偏离程度达到极值,相对功率谱峰值约为 19 倍,但同时可看到新疆新源—和静地震临震阶段内功率谱异常偏离年均值和标准差值较大,地震前后持续偏离年均值和标准差的时间为 105 天。

(2) 2012 年 11 月 11 日缅甸发生 $M_s 7.0$ 地震。此次地震的中波红外相对功率谱异常在 8 月底出现于震中的西北和东南部;随时间推移,异常沿顺时针方向转移并最终集中于震中北部和南部,9 月下旬震中南部异常向震中靠拢并逐渐包络震中,幅度迅速增大(图 3);随后异常幅度有所减弱,面积也有所收缩,至 10 月中旬又有一次小幅回升,震中及南北部异常贯穿形成了南北向的条带状分布形态;最后整个异常减弱,至 10 月底基本消失。该异常达峰值时大于 8 倍的面积约为 9 万 km^2 ,功率谱的对应周期为 13 天。其时序曲线[图 2(b)]显示,中波红外异常变化出现在此次地震前短时间内,小区域地震当年时序曲线在震前 74 天(即 2012 年 8 月 29 日)开始偏离年均值与标准差曲线,震前 48 天(即 9 月 24 日)偏离程度达到最大,相对功率谱峰值约为 22 倍,地震前持续偏离年均值与标准差的时间为 56 天。

(3) 2013 年 4 月 20 日四川芦山发生 $M_s 7.0$ 地震,震中位于龙门山断裂带南段。龙门山断裂带为典型的逆冲推覆构造,具有前展式发育特征。此次地震为龙门山断裂带持续向东南逆冲扩展、地壳挤压缩短的产物^[19]。地震中波红外相对功率谱异常出现于 4 月上旬,主要分布在震中及其东南部;随时间推移,异常沿鲜水河断裂方向以条带状形态向震中发展,幅度不断增强,4 月 20 日可明显观察到震中边缘异常恰位于龙门山后山断裂与鲜水河断裂交汇处;4 月 27 日异常幅度达到峰值(图 3),随后东南部连向震中的异常条带有所减弱,5 月中旬异常幅度又出现较明显的增强现象,此后逐渐减弱,到 6 月初异常基本消失。中波红外异常功率谱达峰值时大于 8 倍的面积约为 4 000 km^2 ,对应周期为 13 天。其时序曲线[图 2(c)]显示出相对功率谱峰值出现在 4 月 27 日(即震后 7 天),约 10 倍,2013 年 4 月 8 日(震前 12 天)开始偏离年均值与标准差值曲线,至

6月11日结束。同时可观察到芦山地震临震阶段内功率谱异常偏离年均值和标准差较大,地震前后持续偏离年均值与标准差的时间为64天。

(4) 2013年7月22日在甘肃岷县漳县交界处发生了 $M_s6.6$ 地震。该地震位于临潭—宕昌断裂带中东段上^[20]。该次地震的中波红外相对功率谱异常出现于5月中旬,主要分布在震中及其东南部;异常区域随时间逐渐增大,震中区域异常经过光盖山—迭山北麓断裂,震中东南部异常经过龙门山断裂持续向东南方向发展,其展布与龙门山断裂一致,并于6月中旬幅值达极值(图3);随后震中部位异常逐渐减弱,至6月下旬消失;震中东南部异常以龙门山断裂为边界向西北方向收缩,并于7月初基本消失,整个异常均出现在地震之前。该异常达峰值时大于8倍的面积约为6万 km^2 ,功率谱的对应周

期为13天。从其时序曲线[图2(d)]可发现,功率谱异常变化出现在此次地震前短时间内,震中附近小区域地震当年时序曲线在震前63天(即2013年5月20日)开始偏离年均值与标准差曲线,震前45天(即6月6日)偏离程度达到最大,相对功率谱幅值约为8倍,持续偏离年均值与标准差的时间为57天。

(5) 2014年8月3日云南鲁甸发生 $M_s6.5$ 地震。该地震属等倾角左旋走滑型地震,发震断层为NW向包谷垭—小河断裂,属大凉山断裂南段组成部分^[21]。该地震的中波红外相对功率谱异常出现于5月初,主要分布在震中东北部;随时间推移,震中东北边缘异常经得雨错—饮马湖断裂逐渐往东南方向发展,最终异常分布形态呈三角形形状(图3),震中恰位于异常边缘的一角上,异常主要分布在四

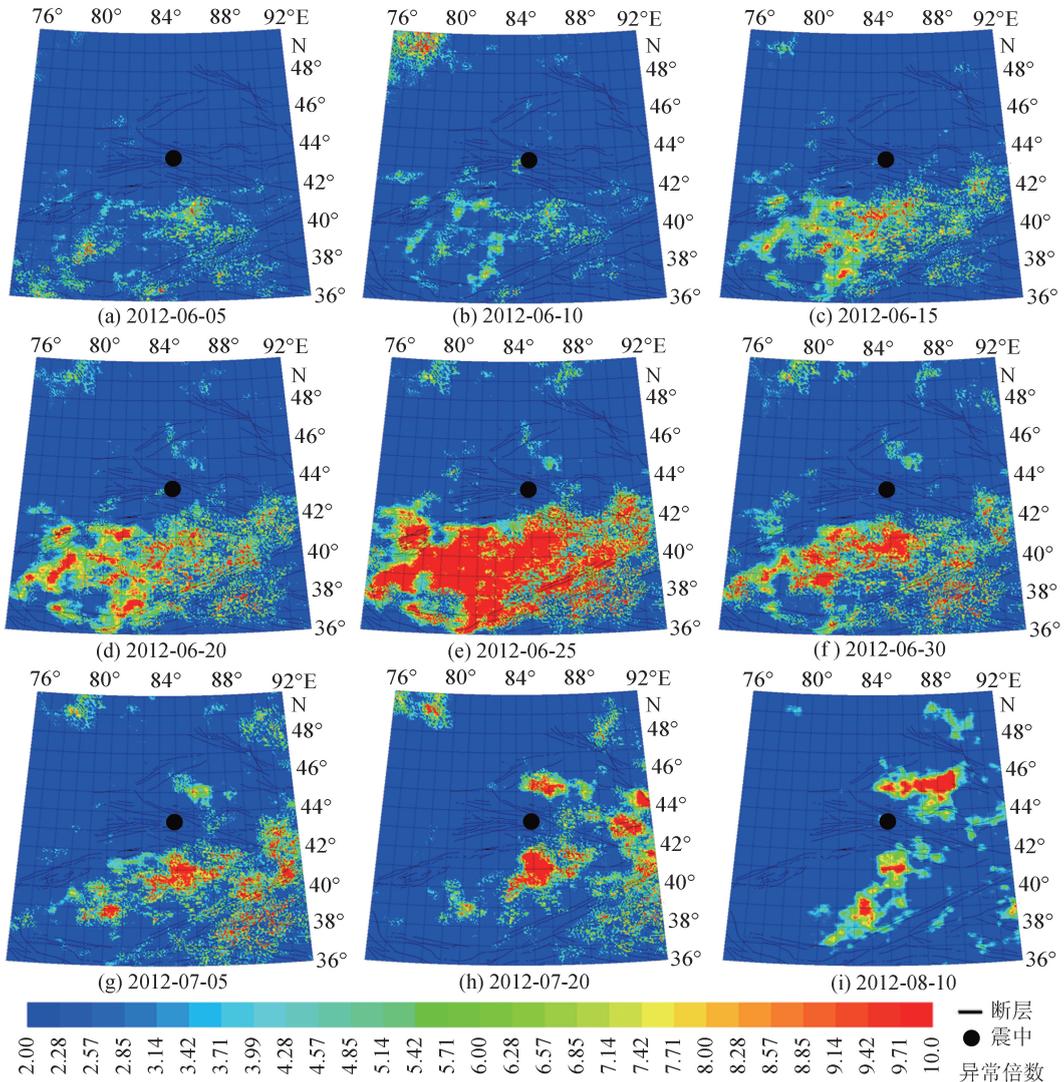


图1 新疆新源—和静6.6级地震相对功率谱时空演化图

Fig.1 Spatio-temporal evolution of relative power spectrum anomalies for Xinyuan—Hejing $M_s6.6$ earthquake

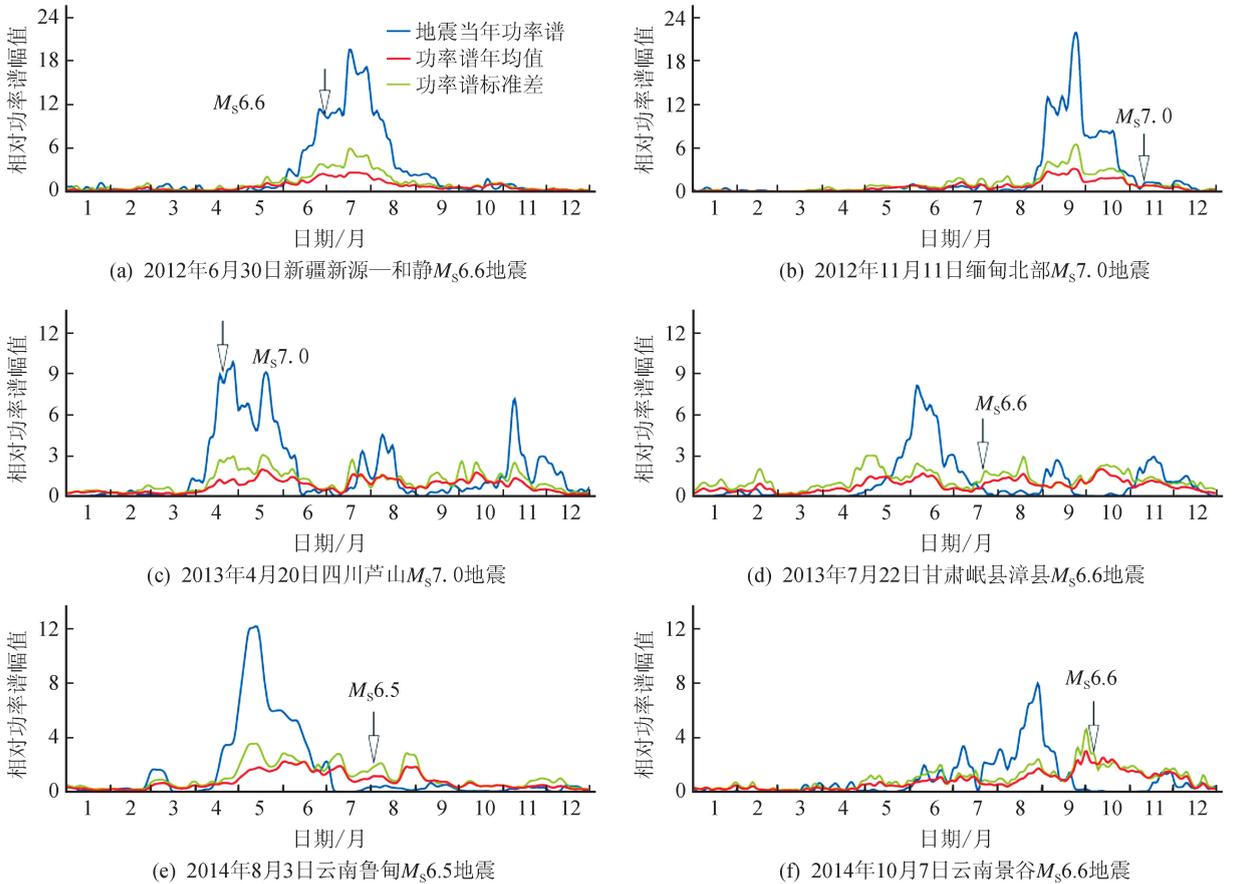


图 2 区域地震当年、年平均和标准差相对功率谱时序曲线

Fig.2 Time-series curves of relative power spectrum for the seismic year,annual average and standard deviation

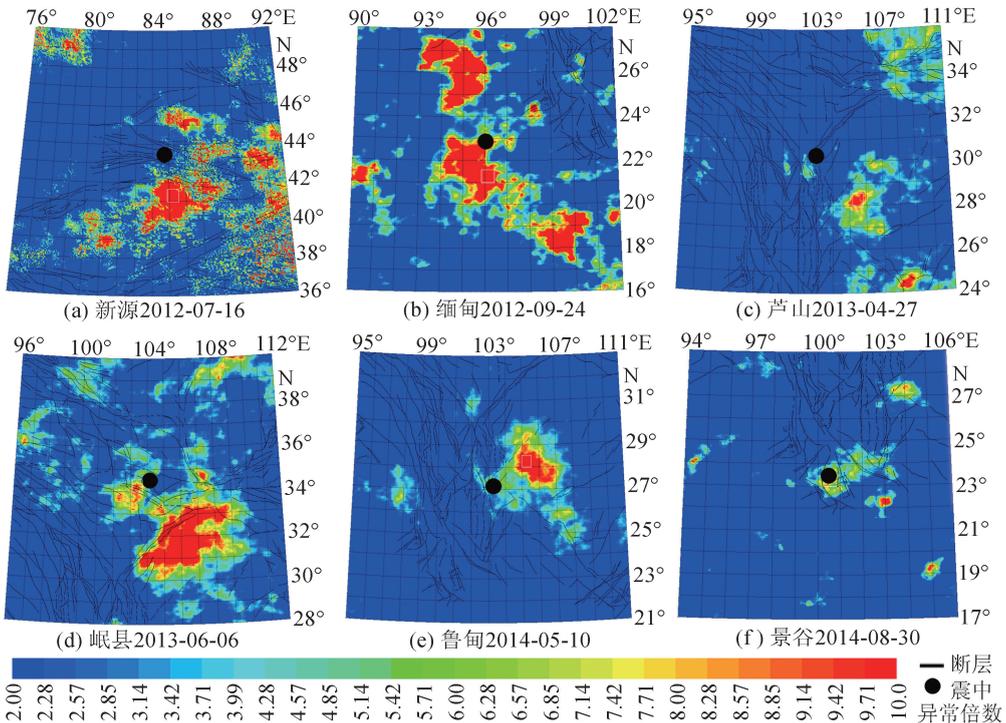


图 3 强震中波红外相对功率谱峰值时空分布(时序曲线对应的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 区域,如白框所示)

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of maximum relative power spectrum of medium-wave infrared for six strong earthquakes (The corresponding $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ area of temporal curve, as the white box shown)

川、云南、贵州交界处的小区域内;最后异常沿西北方向收缩,至6月下旬完全消失,整个异常变化从出现到消失都发生在地震之前。该异常达峰值时大于8倍的面积约为2万 km^2 ,功率谱的对应周期为32天。其时序曲线[图2(e)]显示,小区域地震当年时序曲线在震前105天(即2014年4月16日)开始偏离年均值与标准差曲线,震前85天(即5月10日)偏离程度达到极值,相对功率谱幅值约为12倍,持续偏离年均值与标准差的时间为68天。

(6) 2014年10月7日云南景谷发生 $M_s6.6$ 地震,是茶房—普文断裂带贯通过程的构造活动表现^[22]。此次地震的中波红外功率谱异常出现于8月中旬,主要分布在震中及其周围的小区域内;此次地震异常范围较小,异常区域内断层错综复杂,被澜沧江断裂和镇远—普洱断裂所包围,随时间推移异常不断增强,异常显著区位于三林场—思永街断裂之上(图3);随后异常向震中收缩,于9月初消失,异常整体演化过程都集中在震中附近并完全出现在发震之前。该地震功率谱异常幅值达极值时大于8倍的面积约为3000 km^2 ,对应周期为11天。其时

序曲线[图2(f)]显示,震中小区域地震当年时序曲线在震前77天(即2014年7月22日)开始偏离年均值与标准差曲线,震前38天(即8月30日)偏离程度达到极值,相对功率谱幅值为8倍,持续偏离年均值与标准差曲线的时间为53天。

综上所述,6次强震前3个月内均存在明显的中波红外异常变化,其主要异常变化特征如表1所列。其中4次强震的异常变化过程完全出现在地震之前,而新源、芦山地震异常变化在震前短临阶段内开始出现,持续到了震后;地震当年功率谱异常偏离年均值和标准差值较大,其异常幅度可达8倍及以上,偏离持续时间为50~105天;异常变化达峰值时对应的面积均在几千到几万 km^2 ,功率谱的对应周期介于11~32天。岷县等4次地震当年功率谱异常偏离年均值和标准差值程度最大时出现在震前3个月内,而新源和芦山地震偏离程度最大值虽然出现在震后,但其在震前短临阶段内偏离程度已较大,功率谱幅度达8倍以上。这些异常变化特征具有强震短期预测指标意义,对即将投入实用的高分辨率静止卫星中波红外资料在地震预测中的应用可提供重要参考。

表1 地震中波红外功率谱异常特征

Table 1 The anomaly characteristics of medium-wave infrared for the six earthquakes

地震三要素			对应 周期	异常峰值 /倍	异常峰值出现 时间/天	异常峰值时 面积/ km^2	持续偏离年均值 与标准差时间/天
时间	地点	震级					
2012-06-30	新疆新源	6.6	11	19	震后16	6万	105天
2012-11-11	缅甸北部	7.0	13	22	震前48	9万	56天
2013-04-20	四川芦山	7.0	13	10	震后7	4千	64天
2013-07-22	甘肃岷县	6.6	13	8	震前45	6万	57天
2014-08-03	云南鲁甸	6.5	32	12	震前85	2万	68天
2014-10-07	云南景谷	6.6	11	8	震前38	3千	53天

4 结论与讨论

本文以风云卫星中波红外资料为基础数据,应用小波变换和功率谱估计方法,对6次6.5~7.0级强震进行分析研究。结果表明,6次强震前3个月内均存在明显的中波红外异常变化,功率谱异常偏离年均值和标准差值较大,其异常幅度可达8倍及以上,偏离持续时间为50~105天。岷县等4个强震的异常演化和异常峰值均出现在地震发生前,而新源、芦山地震异常变化在震前短临阶段内开始出现并持续到了震后,同时新源和芦山地震功率谱异常幅值在震前短临阶段内已达到8倍以上。6次强震功率谱异常达峰值时对应的面积均在几千到几万 km^2 ,对应周期介于11~32天。中波红外相对功率谱异常幅值达到8倍以上,持续偏离年均值与标准

差值的时间大于50天等异常变化特征指标容易识别且便于应用,并具有地震短期预测意义,可为高分辨率对地观测重大专项中高分4、5号静止卫星携带的中波红外波段资料应用于地震预测提供重要参考,同时也可为将来实现多波段同时监测地震重点危险区的热辐射变化进行震情跟踪提供参考。

但本文提取的这些异常变化特征指标是初步的,需要更多震例和实践应用来加以完善。在实际应用中,由于中波红外相对功率谱异常面积、偏离年均值与标准差的持续时间和幅度等与地震震级的关系不明显,如要对可能发生的地震三要素进行判断,需要将断层的地震活动性、地形变、GPS及流体观测等手段结合起来使用。

致谢:感谢国家卫星气象中心提供的静止气象卫星中波红外遥感资料。

参考文献(References)

- [1] В И ГОРНЫЙ.地球热红外辐射——地震活动性的标志[J].А Н С С,1988,301(1):67-69.
В И ГОРНЫЙ.The Earth Thermal Infrared Radiation——A Signal of Seismicity[J].А Н С С,1988,301(1):67-69.(in Chinese)
- [2] 李青梅,张元生,吕俊强,等.2014年10月7日云南景谷 $M_s6.6$ 地震热红外异常[J].地震工程学报,2015,37(4):1008-1012.
LI Qing-mei,ZHANG Yuan-sheng,LV Jun-qiang,et al.Thermal Infrared Occurring before the Jinggu,Yunnan $M_s6.6$ Earthquake on October 7,2014[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(4):1008-1012.(in Chinese)
- [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,1998,28(6):564-574.
QIANG Zu-ji,LIN Chang-gong.The Short Seismic Precursor of Satellite Thermal Infrared Brightness Temperature Anomalies [J].Science in China;Sereis D,1998,28(6):564-574.(in Chinese)
- [4] Saraf A K,Kanika M Z.Satellite Detection of Thermal Precursors of Yamnotri,Ravar and Dalbandin Earthquakes[J].Nature Hazard,2012,61:861-872.
- [5] Tronin A A,Hayakawa M,Molchanov O A.Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Japan and China[J].J Geodyn,2002,35:519-534.
- [6] 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.
ZHANG Yuan-sheng,SHEN Wen-rong,XU Hui.Satellite Thermal Infrared Anomaly before the Xinjiang Qinghai $M_s8.1$ Earthquake[J].Northwestern Seismological Journal,2002,24(1):1-4.(in Chinese)
- [7] 刘德富,彭克银,刘维贺,等.地震有“热征兆”[J].地震学报,1999,12(6):710-715.
LIU De-fu,PENG Ke-yin,LIU Wei-he,et al.Some Signals of Earthquakes Thermal Anomalies[J].Acta Seismologica Sinica,1999,12(6):710-715.(in Chinese)
- [8] 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.
QU Chun-yan,SHAN Xin-jian,MA Jin.Study on the Methods for Extracting Earthquake Thermal Infrared Anomaly[J].Advances in Earth Science,2006,21(7):699-705.(in Chinese)
- [9] Cui C Y,Deng M D,Geng N G.Rock Spectral Radiation Signatures under Different Pressures[J].Chinese Science Bulletin,1993,30(16):1378-1382.
- [10] 耿乃光,于萍,邓明德,等.热红外震兆成因的模拟实验研究[J].地震,1998,18(1):83-88.
GENG Nai-guang,YU Ping,DENG Ming-de,et al.The Simulated Experimental Studies on Case of Thermal Infrared Precursor of Earthquakes[J].Earthquake,1998,18(1):83-88.(in Chinese)
- [11] 陈梅花,邓志辉,马晓静,等.断层带内外温差法在震前红外异常研究中的应用[J].地震地质,2007,29(4):863-872.
CHEN Mei-hua,DENG Zhi-hui,MA Xiao-jing,et al.Application of the Inside-outside Temperature Relation Analysis Method in Study on Satellite Infrared Anomalies Prior to Earthquake[J].Seismology and Geology,2007,29(4):863-872.(in Chinese)
- [12] 荆凤,申旭辉,康春丽,等.中强地震前的长波辐射异常震例研究[J].地震,2009,29(4):117-122.
JING Feng,SHEN Xu-hui,KANG Chun-li,et al.Anomalies of Outgoing Long-wave Radiation before Some Medium to Large Earthquakes[J].Earthquake,2009,29(4):117-122.(in Chinese)
- [13] Zhang Y S,Guo X,Zhong M J,et al.Wenchuan Earthquake: Brightness Temperature Changes from Satellite in Infrared Information[J].Chinese Science Bulletin,2010,55(3):1-7.
- [14] 郭晓,张元生,钟美娇,等.提取地震热异常信息的功率谱相对变化法及震例分析[J].地球物理学报,2010,53(11):2668-2695.
GUO Xiao,ZHANG Yuan-sheng,ZHONG Mei-jiao,et al.Variation Characteristics of OLR for the Wenchuan Earthquake[J].Chinese J Geophys,2010,53(11):2688-2695.(in Chinese)
- [15] 郭晓,张元生,魏从信,等.汶川 8.0 级地震和仲巴 6.8 级地震中波红外热辐射异常[J].地球学报,2014,35(3):338-344.
GUO Xiao,ZHANG Yuan-sheng,WEI Cong-xin,et al.Medium Wave Infrared Brightness Anomalies of Wenchuan 8.0 and Zhongba 6.8 Earthquakes[J].Acta Geoscientica Sinica,2014,35(3):338-344.(in Chinese)
- [16] 郭晓,张元生,魏从信,等.2008年于田 $M_s7.3$ 和 2010年玉树 $M_s7.1$ 两次地震前中波红外遥感异常研究[J].地震学报,2014,36(2):175-183.
GUO Xiao,ZHANG Yuan-sheng,WEI Cong-xin,et al.Anomalies of Middle Infrared Brightness before 2008 Yutian $M_s7.3$ and 2010 Yushu $M_s7.1$ Earthquakes[J].Acta Seismologica Sinica,2014,36(2):175-183.(in Chinese)
- [17] 陈顺云,刘培洵,刘力强,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.
CHEN Shun-yun,LIU Pei-xun,LIU Li-qiang,et al.Wavelet Analysis of Thermal Infrared Radiation of Land Surface and Its Implication in the Study of Current Tectonic Activities[J].Chinese J Geophys,2006,49(3):824-830.(in Chinese)
- [18] 李志海,郑勇,谢祖军,等.2012年6月30日新疆新源—和静 $M_s6.6$ 地震发震构造初步研究[J].地球物理学报,2014,57(2):447-458.
LI Zhi-hai,ZHENG Yong,XIE Zu-jun,et al.A Preliminary of Seismogenic Structure for the Xinyuan—Hejing,Xinjiang $M_s6.6$ Earthquake of June 30,2012[J].Chinese J Geophys,2014,57(2):447-458.(in Chinese)
- [19] 梁明剑,郭红梅,李大虎,等.2013年四川芦山 7.0 级地震发震构造机理及青衣江上游流域地貌的响应[J].地震前缘,2013,

20(6):21-28.

LIANG Ming-jian, GUO Hong-mei, LI Da-hu, et al. The Seismogenic Tectonic Mechanism of the Lushan $M_s7.0$ Earthquake and the Geomorphological Response of the Upstream Drainage of Qingyijiang River, in 2013, Sichuan, China [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(6): 21-28. (in Chinese)

[20] 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等. 2013年甘肃岷县漳县 6.6 级地震触发滑坡及其构造分析[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 616-626.

XU Chong, XU Xiu-deng, ZHENG Wen-jun, et al. Landslides Triggered by the 2013 Minxian—Zhangxian, Gansu Province $M_s6.6$ Earthquake and Its Tectonic Analyses [J]. Tectonophysics, 2013, 35(3): 616-626. (in Chinese)

[21] 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 等. 鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3060-3068.

XU Xi-wei, JIANG Guo-yan, YU Gui-hua, et al. Discussion on Seismogenic Fault of the Ludian $M_s6.5$ Earthquake and Its Tectonic Attribution [J]. Chinese J Geophys, 2014, 57(9): 3060-3068. (in Chinese)

[22] 吴坤罡, 吴中海, 徐甫坤, 等. 滇西南 2014 年景谷-强震群的地质构造成因[J]. 地质通报, 2016, 35(1): 140-151.

WU Kun-gang, WU Zhong-hai, XU Fu-kun, et al. The Architectonic Origin of Jinggu Strong Earthquake in Group in 2014 [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(1): 140-151. (in Chinese)

(上接 976 页)

[7] 侯康明, 韩有珍, 张守杰. 断层崖形成年代的数学模拟计算[J]. 西北地震学报, 1995, 17(2): 68-75.

HOU Kang-ming, HAN You-zhen, ZHANG Shou-jie. Mathematical Model Calculation of Fault Scarp Age [J]. Northwestern Seismological Journal, 1995, 17(2): 68-75. (in Chinese)

[8] Wallace R E. Profiles and Ages of Young Fault Scarps, North-central Nevada [J]. Geol Soc Am Bull, 1977, 88: 1267-1281.

[9] 常宏, 张培震, 安芷生, 等. 昆仑山北坡鸭子泉河阶地发育及其构造-气候意义[J]. 科学通报, 2005, 50(9): 912-917.

CHANG Hong, ZHANG Pei-zhen, AN Zhi-sheng, et al. Formation of the Yazhi Spring Stream and Its Signification on Tectonics-climate on the Northern Slope of Kunlun Mountain [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(9): 912-917. (in Chinese)

[10] Bendick R, Bilham R, Freymueller J, et al. Geodetic Evidence for a Low Slip Rate in the Altyn Tagh Fault System [J]. Nature, 2000, 404: 69-72.

[11] Burbank D W, Anderson R S. Tectonic Geomorphology [M]. Massachusetts: Blackwell Science, 2002: 1-274.

[12] Keller E A, Pinter N. Active Tectonics: Earthquake, Uplift, and Landscape, Upper Saddle River [M]. New Jersey, Prentice Hal, 1996.

[13] Sung Q C, Chen Y C, Chao P C. Spatial Variation of Fractal parameters and Its Geological Implications [J]. Terrestria 1, Atmospheric and Oceanic Sciences, 1998, 9(4): 655-672.

[14] Pike R J, Wilson S E. Elevation-relief Ratio, Hypsometric Integral, and Geomorphic Area-altitude Analysis [J]. Geological Society of America Bulletin, 1971, 82: 1079-1084.

[15] Kirby E, Whipple K. Quantifying Differential Rock-uplift Rates Via Stream Profile Analysis [J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, 29: 415-418.

[16] Strahler A N. Hypsometric (Area-altitude) Analysis of Erosional Topography [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952, 63: 1117-1142.