

DOI: 10.13745/j.esf.2017.02.022

# 尼泊尔 8.1 级地震卫星热红外异常解析

张璇<sup>1</sup>, 张元生<sup>1,2</sup>, 郭晓<sup>1,2</sup>, 魏从信<sup>1,2,\*</sup>, 张丽峰<sup>1</sup>

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

ZHANG Xuan<sup>1</sup>, ZHANG Yuansheng<sup>1,2</sup>, GUO Xiao<sup>1,2</sup>, WEI Congxin<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Lifeng<sup>1</sup>

1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

**ZHANG Xuan, ZHANG Yuansheng, GUO Xiao, et al. Analysis of thermal infrared anomaly in the Nepal M<sub>s</sub> 8.1 earthquake.**  
*Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2): 227-233

**Abstract:** Aiming at the thermal infrared anomaly in the epicentral area of Nepal M<sub>s</sub> 8.1 earthquake, this paper collected the infrared remote sensing brightness temperature data of China Geostationary Meteorological satellite FY-2C/E, and analyzed the data by using power spectrum transform method. The results showed that the thermal anomaly had obvious temporal and spatial characteristics, and the anomaly range was in irregular zonal distribution, which gradually expand over time and tend to peak when the earthquake occurred. The epicenter was always located in the edge of anomaly area, and the anomaly rapidly shrank after the earthquake until completely disappeared. The change process of thermal anomaly was divided into three stages, namely preliminary display, rapid development and gradual decay, whose duration was more than 45 days, characteristic period was 16 days, and the magnitude of relative variation was more than 12 times. Through the comparative study, we found that the evolution of thermal infrared characteristics in this earthquake was similar to Wenchuan earthquake, mainly reflected in the evolution process, morphology and the relationship of seismic moment and epicenter location with the anomaly area. These two earthquake cases only had different characteristic period and peak value, and this difference may be related to the regional stress, climatic factors and special geological environment. The cognizance in this paper had certain enlightenment function to determine the relationship between the thermal anomalies and the three elements of earthquake, and had a great significance to the thermal infrared monitoring and earthquake prediction.

**Key words:** Nepal M<sub>s</sub> 8.1 earthquake; thermal-infrared brightness temperature; relative power spectrum; Wenchuan earthquake

**摘要:** 针对 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震前后在震中区附近出现的大范围热红外异常, 以中国静止卫星 FY-2C/E 亮温资料为数据源, 采用功率谱相对变化法进行数据处理和资料分析, 结果表明: 震前热异常具有显著的时空特征, 异常范围呈不规则带状分布, 且随时间推移逐渐扩大, 至震时异常面积趋于峰值, 震中始终位于异常区域的边缘部位, 震后异常快速收缩减弱, 直至完全消失。该次热异常变化表现为初步显现、加速发展至逐步衰减的过程, 持续时间在 45 天以上, 特征周期为 16 天, 相对变化幅度达 12 倍多。通过相似震例对比研究发现, 该次地震与汶川大地震的热红外时空演化特征存在一定共性, 主要体现在热异常的演化过程、异常形态、发震时刻及震中位置与异常区域的关系上, 仅特征周期和特征幅值有所不同, 应与各区域应力变化、气候因素及特殊的地质环境相关。这些认识对热异常与地震三要素的关系判定有一定启示作用, 对地震热红外监测预报工作具有重要意义。

收稿日期: 2015-07-30; 修回日期: 2016-03-03

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项目(2014Y01)

作者简介: 张璇(1985—), 女, 助理研究员, 主要从事地震卫星应用研究。E-mail: zhangxi198565@126.com

\* 通讯作者简介: 魏从信(1985—), 男, 助理研究员, 主要从事卫星遥感应用与地震学方面的研究工作。E-mail: weicx12@163.com

**关键词:**尼泊尔 8.1 级地震;卫星热红外亮温;相对功率谱;汶川地震

**中图分类号:**P315.7;P407.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2017)02-0227-07

2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分尼泊尔发生 8.1 级地震,震中位于  $28.2^{\circ}\text{N}, 84.7^{\circ}\text{E}$ ,震源深度 20 km。此次地震震感剧烈,造成了大量的人员伤亡、文物古迹的破坏以及巨大的经济损失,并引起了全世界人民的关注。震中区位于由印度次大陆和欧亚大陆板块的移动与挤压形成的喜马拉雅地震带,近两年由于板块冲撞加剧已进入一个活跃期<sup>[1-2]</sup>。本次地震或对周边地球物理场进行了改变和调整,从其所处地理位置上判断,它可能增强了我国西南部地质活动活跃区地震发生的危险性。

众多学者通过对典型震例卫星遥感资料的分析研究,发现强震发生前后存在不同程度的“热震兆”现象<sup>[3-17]</sup>。马瑾和单新建在研究 1997 年玛尼 7.9 级地震前后震中区地温图像的动态演化过程中发现,震前 20 天阿尔金断裂东段出现增温现象,随后逐渐扩展并呈明显条带,该条带一直持续到玛尼强震的发生<sup>[18]</sup>。徐秀登等研究台湾南投 7.6 级大地震前的卫星热红外异常时,发现震前卫星红外异常明显,并取得了宝贵的临震红外异常记录<sup>[19]</sup>。郭卫英等利用 NOAA 卫星热红外遥感图像对新疆塔里木盆地进行研究,对比分析发现塔里木盆地周边的 2 次中强震震前 1 个月均有不同程度的红外增温现象,并对增温现象的分布范围、异常持续时间和地震三要素的关系进行了探讨<sup>[20]</sup>。考虑到地震热信息属于强干扰下的弱信号,受区域地质环境和大气环境等的影响较大,张元生等<sup>[21-22]</sup>及郭晓等<sup>[23]</sup>采用不同于以往的处理方法,应用小波变换和相对功率谱估计分析静止卫星热红外遥感资料研究汶川等地震,发现地震发生前存在明显的热异常特征周期和特征幅值。基于此,本文以中国静止气象卫星红外遥感资料为数据源,应用小波变换和相对功率谱估计方法研究尼泊尔 8.1 级地震前后出现可识别的热红外异常特征,同时对比相似震例,结合研究区的特殊地质环境及构造,分析异常的分布区域、演化过程及功率谱相对变化率。

## 1 热红外亮温数据

本文中,笔者采用中国静止气象卫星 FY-2C/E 的红外遥感亮温产品数据作为原始资料,FY-2C/E

卫星主要荷载为红外和可见光自旋扫描辐射计 VISSR,该辐射计主要包括 5 个光谱通道,详细的技术指标见表 1。FY-2C 发射于 2004 年 10 月 19 日,FY-2E 发射于 2008 年 6 月 15 日,两颗卫星距地面高度 35 000 多 km,均定点于东经  $105^{\circ}$  赤道上空,观测范围可覆盖我国及周边区域。用于本文研究的黑体亮温温度(TBB)是由该卫星通过扫描辐射计观测下垫面物体获取的辐射值经量化处理后获得的,它反映的是不同下垫面的亮温情况。根据波长范围及用途,文中数据由卫星通道红外 1 观测到的计数值与对应的温度查表比较得到。

表 1 辐射计主要技术指标<sup>[24]</sup>  
Table 1 Main technical index of radiation meter<sup>[24]</sup>

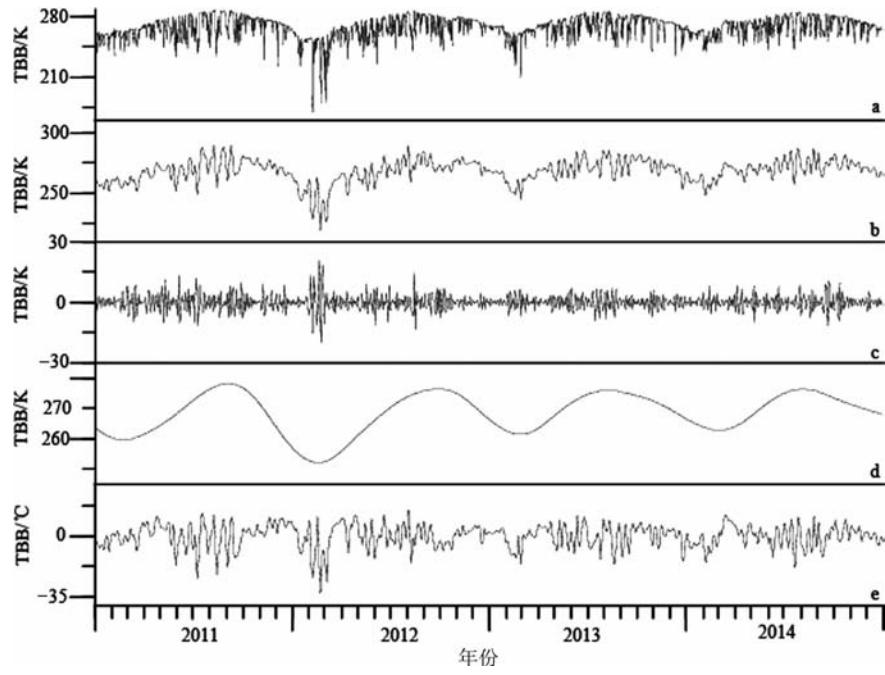
通道	波段/ $\mu\text{m}$	星下点分辨率/km	用途
可见光	0.55~0.90	1.25	白天的云、雪、水体
红外 1	10.30~11.30	5.00	昼夜云、下垫面温度、云雪区分
红外 2	11.50~12.50	5.00	昼夜云
红外 3	6.30~7.60	5.00	半透明卷云的云顶温度、中高层水汽
红外 4	3.50~4.00	5.00	昼夜云、高温目标

本文使用“风云卫星遥感数据网”系统获得数据产品文件,数据存储为 HDF 格式,考虑卫星的有效覆盖范围,选定区域为  $5^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}, 55^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 。由于热红外观测受太阳辐射的影响非常显著,为消除该影响,笔者选择北京时间 23 时至次日凌晨 7 时之间的数据,再使用补窗法进行处理,即对每天 5 个时段的观测数据先进行格式转换,之后依照观测质量要求,剔除错值、云干扰值及不符合黑体辐射公式的高值,计算剩余数据的均值,从而得到扣除部分云影响的亮温日值,以二进制格式建立原始数据库。

## 2 亮温资料前兆数据处理及提取方法

### 2.1 小波变换

小波变换是近年来迅速发展并广泛应用于数字信号处理的一种数学工具,它能在时间域和频率域同时具有良好的局部化特性,并聚焦到对象的任何细节。而卫星热红外遥感获得的连续亮温数据囊括了地球的基本热辐射场、年变温度场、日变温度场以



a—亮温原始数据; b—2阶小波低频部分; c—2阶小波高频部分; d—7阶小波低频部分; e—2阶小波低频部分与7阶小波低频部分之差。

图 1 小波变换信息提取图

Fig. 1 Information extraction through wavelet transformation

及云雨和寒热气流引起温度变化的影响,因此想从中有效的寻找到与地震前兆相关的信息十分困难。本文将采用 Daubechies 小波系中的 db8 小波基对亮温数据进行小波变换处理。为去除地球基本温度场、年变温度场和地形的影响,需先舍去小波 7 阶的低频部分;为去除由于云雨和寒热气流引起的短时段的温度变化,需再舍去小波 2 阶的高频部分。最后所有数据进行小波 2 阶的低频部分减去小波 7 阶的低频部分的计算,从而得到亮温相对变化波形数据(单位为 $^{\circ}\text{C}$ ),该数据时间域正负相间,且其时间周期范围内包含着强震信息的短临异常周期范围(图 1)。

## 2.2 功率谱估计及相对处理

功率谱估计是数据信号处理的重要手段之一,它根据有限数据提取在频域内被淹没在噪声中的有用信号,以此识别信号在频域中的各种特征,因此利用傅里叶变换可研究确定性信号的频谱分布特征。功率谱估计可以通过信号的相关性估计出接收信号的功率随频率变化的关系,揭示信号中隐含的周期性及相距较近的谱峰等有用信息。为了研究地震前后热辐射变化的功率谱与其他时段的差异,同时考虑到亮温数据的大存储量及不易处理程度,文中将采用功率谱估计法来获取其优势频率和幅值。由于

多数地震中热红外短临异常的持续时间多在 10 天至 3 个月左右,故以  $n=64$ (可令  $n=32, 64, 128$  等)天为窗长、 $m=1$ (可令  $m=1, 2, 3$  等)天为滑动窗做傅里叶变换。对于各个像元的时频数据,约定时间为窗内数据的起始时间,这样每滑动一次可得到一组功率谱,从而获得时频空间数据。其次,为了去除地理位置及海拔高度对观测值的影响,我们对每一像元的所有功率谱做相对幅值处理,即先计算各像元点在时频域内每一频率幅值的平均值,再用各频率的平均值除其对应频率幅值即可获得空间相对功率谱值。最后,运用上述步骤获得的时频空间数据和图像处理技术进行全频段的时空扫描,即可识别异常区域,从而进一步提取和分析异常区域的时空演化特征<sup>[19-23]</sup>。

## 3 资料处理结果分析

### 3.1 尼泊尔地震热红外异常变化特征

2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生 8.1 级地震,震中位于加德满都西北约 80 km,该次地震属于逆冲型地震,释放的能量与我国 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_{\text{s}} 8.0$  地震相当。根据对热红外异常区域追踪扫描得到的大范围初步图像发现(图 2),特征周期为

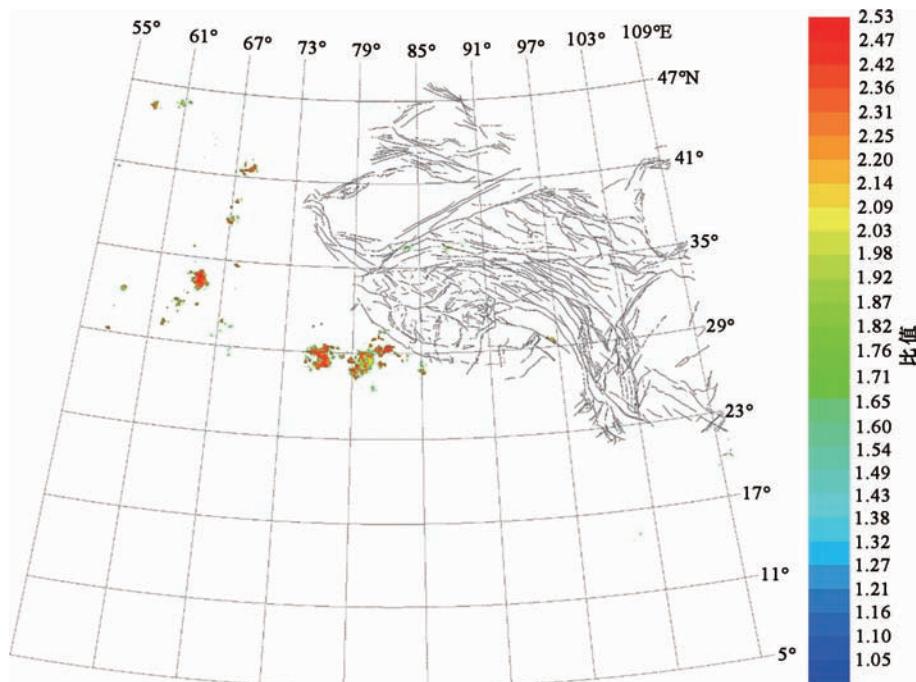


图 2 尼泊尔  $M_s$  8.1 级地震前 13 天功率谱图值  
Fig. 2 Power spectrum value of 13 days before Nepal  $M_s$  8.1 earthquake

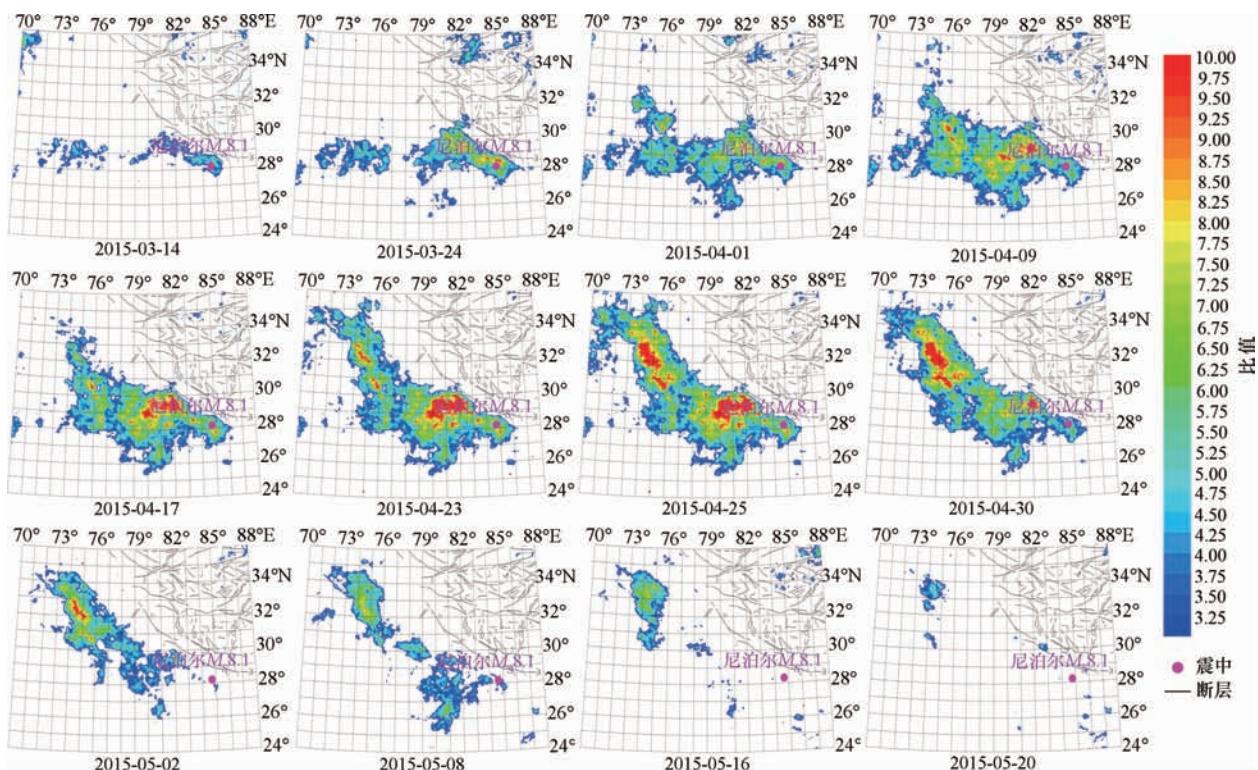


图 3 尼泊尔  $M_s$  8.1 级地震前后热红外亮温功率谱时空演化图

Fig. 3 Temporal and spatial evolution maps of thermal infrared power spectrum of Nepal  $M_s$  8.1 earthquake

16 天的平面功率谱信息图像中有一处明显的异常区域(图中大面积红色区域), 其中大范围的高值显示在尼泊尔境内。为了观察和研究地震发生前后热

红外亮温的异常演化过程, 文中设定局部扫描分析地理范围为  $24^{\circ} \sim 36^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ} \sim 88^{\circ}\text{E}$ , 该区域在地震前后的相对功率谱时空演化图显示(图 3), 震中及其

以西区域在震前 50 天左右出现小面积热异常, 异常范围随时间推移逐渐向震中区北西方向扩大, 并呈现不规则带状分布, 至 4 月 30 日热异常面积始终保持持续增大状态, 在发震时段异常面积趋于峰值, 震中始终处于异常区东部的边缘部位。震后 2 天(4 月 27 日)异常面积增至最大值, 随后开始进入震后恢复阶段, 震中区附近异常快速收缩减弱, 直至 5 月 20 日左右热异常现象基本消失。通过分析该次地震的时空演化过程发现, 异常变化形态相对突出, 异常辐射强度较大, 同发震区该季节气温变化不符; 发震位置在异常最集中区域的边缘部位, 同大多数震例结果相符。

### 3.2 尼泊尔地震热红外亮温平均谱值时间变化特征

热红外异常区的平均谱值时间序列分析是用于判断异常变化的有效方法, 可直观反映热异常区域亮温变化的总体趋势, 亦可观察亮温异常的持续时间及相对变化率的具体情况。从该区域近五年数据的平均谱值时序图曲线上可得到如下特征(图 4): (1)该次地震震前特征功率谱幅值大于 2 倍的持续时间在 45 天以上, 时间特征相对突出; (2)该次热异常特征周期约为 16 天, 相对变化率达到 12 倍以上(2015 年 4 月 16 日左右), 为近三年数据的最大值; (3)2015 年 3 月底至发震日, 平均谱值陡增, 发震时刻恰好处在异常峰值回落的时段; (4)该区域热异常年变幅度波动不大, 相对平缓, 仅在 2012 年 7 月出现过较大峰值, 由于此次高值持续时间较短, 通过以往震例研究结果及相关判定经验考虑, 应与该地区的特殊地质环境、地壳运动及短周期气象因素相关。

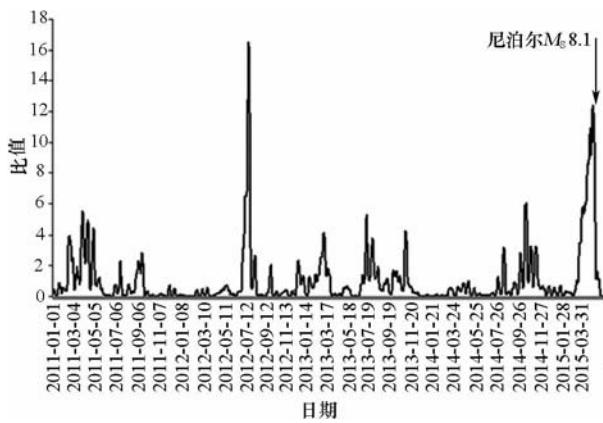


图 4 异常区平均谱值随时间的变化关系(纵轴为相对变化率)

Fig. 4 Time-series curves of average spectral value in abnormal area (the vertical axis is the relative rate of change)

### 3.3 相似震例对比分析

热红外的临震增温异常时空动态特征是震前

瞬时构造运动及其产生的地震活动的具体表现<sup>[25]</sup>, 它与地震的孕育、发生及地震三要素之间都存在着必然联系, 通过大量震例的总结及相似震例的对比工作可对揭示其内在关系并提取预测指标有所帮助。

本文选取 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_S$  8.0 级地震与尼泊尔地震进行对比研究, 考虑两次地震时段均有有效的热红外亮温资料, 且地震震级相近, 影响程度相似, 故采用同样的数据处理流程进行分析比较。汶川地震发生于 NE 走向的龙门山断裂带, 造成至少两条断裂同时破裂, 通过使用时频相对功率谱法进行局部扫描发现(图 5), 震前一个月左右在发震断裂带北东部地区出现功率谱信息增强现象, 随后逐渐向震中及断裂带以南的四川盆地扩大, 至 5 月 20 日左右异常强度达到最大, 异常形态整体覆盖龙门山断裂带, 震后 20 天左右热红外异常开始向震中位置收缩, 直至 6 月底消失。该次地震震前功率谱幅值是三年数据的最大值(图 6), 相对变化率达 8 倍左右, 特征周期为 15 天, 发震时刻位于最大幅值后的第 11 天。分析对比这两次地震发生前后的热红外异常特征可得到如下相似点(表 2)。

表 2 地震热红外异常特征相似点对比

Table 2 Comparison of the thermal infrared anomaly similarity

地震 (时间、地点)	震级 $M_S$	特征 周期/d	发震 时段	最大 峰值	异常形态
2008 年 5 月 12 日 汶川	8.0	15	峰值后 11 天	8	沿断层似带状分布, 震中在异常区边缘
2014 年 4 月 25 日 尼泊尔	8.1	16	峰值后 10 天	12	沿断层似带状分布, 震中在异常区边缘

由于区域地质环境和大气环境等条件的不同, 地震热红外前兆异常在异常区域的持续时间、分布大小及演化过程上都会有所差别。本文中比较的两次相似震例在经过相同的处理方法后, 地震前后均出现了不同程度的热辐射异常现象, 热异常的持续时间都在 2 个月以上且地震发生于峰值过后的 10 天左右, 演化过程都经历了从初始增温到加强增温的过程, 且震中都位于异常区的边缘并均为异常出现及消失的过渡区域, 上述相似点得到的初步结论可为判定发震时刻及震中位置提供一些帮助。而二者在热红外特征周期及最大峰值上却存在一些差异, 皆因上述特征值不仅受到震级大小的影响, 还与各区域不同的气候环境及地质条件有关。已

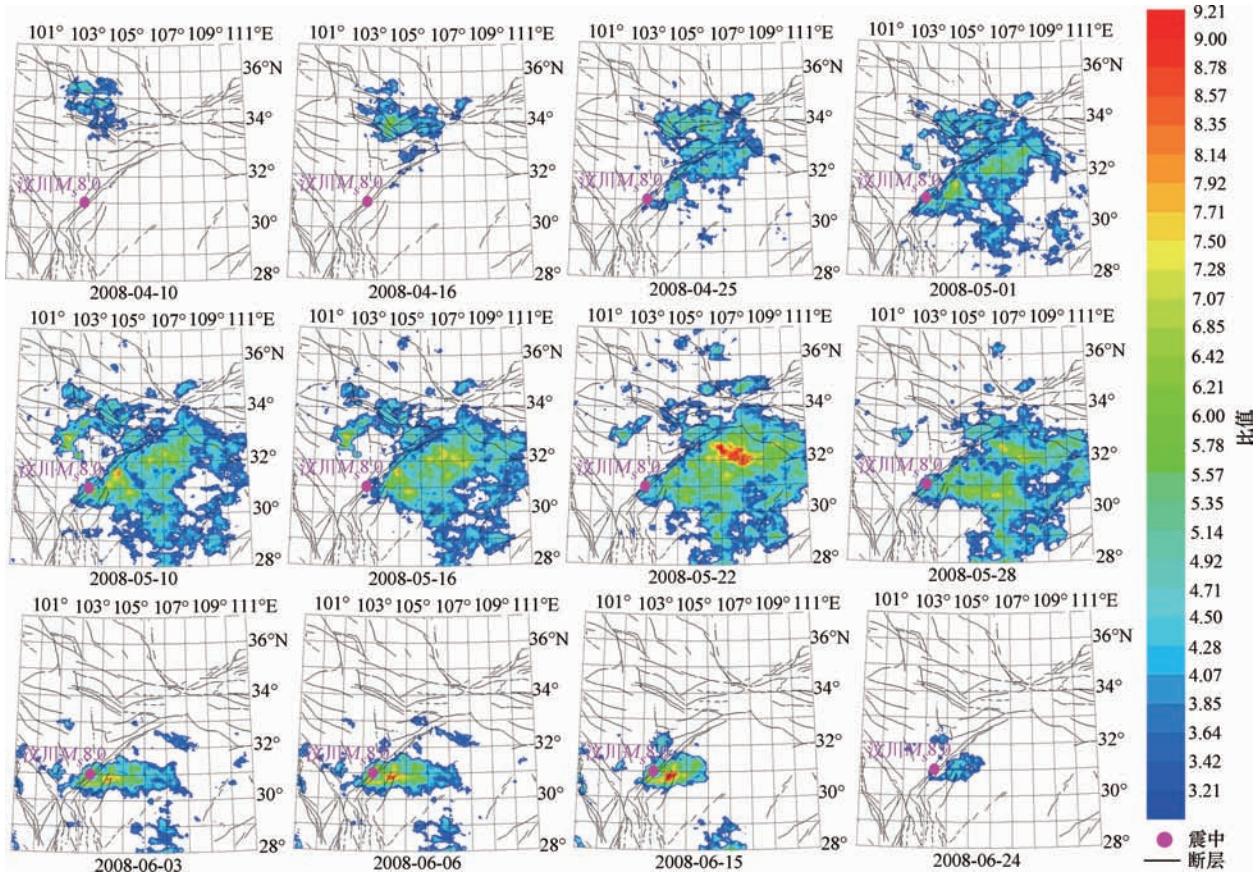
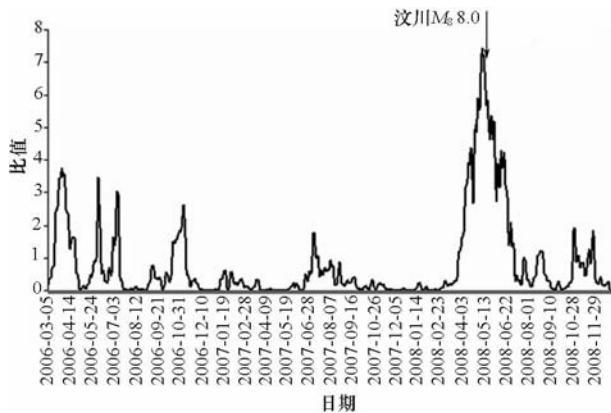
图 5 汶川  $M_S$  8.0 级地震前后热红外亮温功率谱时空演化图Fig. 5 Temporal and spatial evolution maps of thermal infrared power spectrum of Wenchuan  $M_S$  8.0 earthquake图 6 汶川地震异常区平均谱值随时间的变换关系  
(纵轴为相对变化率)

Fig. 6 Time-series curves of average spectral value in abnormal area of Wenchuan earthquake (the vertical axis is the relative rate of change)

有的研究结果也表明,对于大陆地震而言,相对于干旱地区的特征周期较长,而相对潮湿地区较短<sup>[26]</sup>,并且地震热辐射强度及异常面积与震级大小关系尚不明确。

此次尼泊尔地震震中地处喜马拉雅块体,印度—欧亚大陆主碰撞带的前沿部位,虽为高海拔地区,但其位于喜马拉雅南麓,受到来自西南方向海风及水汽的影响,因而气候温润、水汽丰沛。震前由于地壳应力的持续增大,地下贯穿地表的裂隙突然增多,导致地球放气温室效应的发生,致使地表及底层大气温度明显上升,应为该次大地震造成热红外异常现象突出、最大峰值及异常面积相对较大的原因。汶川地震热红外亮温的异常区域主要集中在发震断裂的东南部,即富含天然气的四川盆地内部,因而出现溢出气体量增大,异常偏向最大值异常区一侧的情况。本文研究中对于相似震例的类比工作还存在许多不完善之处,需不断进行实践检验和震例总结,从而逐步弄清各种环境干扰因素的影响力,以提高其作为地震预测指标的可信度。

## 4 结论

利用静止卫星热红外遥感信息获取的相对功率

谱时空演化图显示尼泊尔  $M_{S8.1}$  级地震前确实出现了突出的热红外亮温异常变化, 存在明显的热异常特征周期和特征幅值。通过对比该次地震与汶川地震的异同点发现, 大地震前的红外增温现象能够持续至震后的一段时间, 且热异常范围的演化过程总体表现为初步显现、加速发展至逐步衰减; 亮温异常区域相对集中, 异常条带的展布方向与发震断层走向基本一致, 说明热异常变化或与断裂活动具有相关性; 异常变化幅度相对较大, 应与地区构造应力场的调整变化及地下环境相关。两次地震所表现的特征周期不尽相同, 都在 15 天左右, 该参量由于受不同区域在震前的气候干湿程度、大气水汽含量及特殊地质环境的影响, 多呈现干旱地区周期长, 潮湿地区周期短的规律。

综合已有的震例研究结果, 热红外亮温前兆异常变化具有一定的短临预测意义。目前, 地震热辐射异常对于时间指标和地点指标是比较明确的, 但大多数依据都是经验性的, 地震发生前在地表引起的异常幅度及异常面积除了与地震强度有关外, 还与震源深度及地下构造存在密切关系, 未来唯有不断尝试和改进数据处理方法, 进一步开展多波段震例对比工作和热红外异常机理研究, 才能提高地震预测的精准度和成功率, 为我国的防震减灾工作做出更大的贡献。

## 参考文献

- [1] 邓起东. 一次全球性新的地震活动高潮[J]. 地震地质, 2012, 34(4): 545-550.
- [2] 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025-2042.
- [3] 刘德福, 彭克银, 刘维贺, 等. 地震有“热征兆”[J]. 地震学报, 1999, 12(6): 710-715.
- [4] SARAF A K, RAWAT V, BANERJEE P, et al. Satellite detection of earthquake thermal infrared precursors in Iran [J]. Nature Hazard, 2008, 47: 119-135.
- [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: 1-4.
- [6] 钟美娇, 张元生. 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦 7.8 级地震热红外异常[J]. 西北地震学报, 2007, 29(2): 137-140.
- [7] 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.
- [8] 邓志辉, 王煜, 陈梅花, 等. 中国大陆几次强地震活动的卫星红外异常分析[J]. 地震地质, 2003, 25(2): 327-337.
- [9] 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.
- [10] 张元生, 郭晓, 张小美, 等. 应用静止卫星热红外遥感亮温资料反演地表温度的方法研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26: 113-117.
- [11] 张景廉, 杜乐天, 曹正林, 等. 再论汶川大地震与深部气体的关系[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 96-101.
- [12] 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.
- [13] 强祖基, 马蔼乃, 曾佐勋, 等. 卫星热红外地震短临预测方法研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 254-256.
- [14] 魏从信, 张元生, 惠少兴. 2009 年 8 月 11 日安达曼群岛  $M_{7.5}$  地震热红外变化[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 41-45.
- [15] 张璇, 张元生, 魏从信, 等. 云南彝良 5.7 级地震前卫星热红外异常[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 171-176.
- [16] 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.
- [17] 钟美娇, 张元生, 郭晓, 等. 卫星热红外和微波遥感资料在地震预报中的应用研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 1059-1063.
- [18] 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.
- [19] 徐秀登, 徐向民, 王煜, 等. 台湾南投 7.6 级地震前热红外异常[J]. 地震学报, 2000, 22(6): 666-669.
- [20] 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.
- [21] 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(3): 904-910.
- [22] 张元生, 郭晓, 魏从信, 等. 日本 9 级和缅甸 7.2 级地震热辐射表现特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2575-2580.
- [23] 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率法及震例分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2688-2695.
- [24] 国家卫星气象中心(NSMC). 风云二号(02)静止卫星气象卫星数据格式[EB/OL]. (2005-01-01)[2015-07-30]. <http://satellite.cma.gov.cn/portalsite/default.aspx>.
- [25] 郑兰哲, 强祖基. 卫星热红外异常影像在地震短临预报中的应用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1996, 21(6): 665-668.
- [26] 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.