

# 2014 年 10 月 7 日云南景谷 $M_s6.6$ 地震热红外异常<sup>①</sup>

李青梅<sup>1</sup>, 张元生<sup>2</sup>, 吕俊强<sup>1</sup>, 任家琪<sup>1</sup>, 张丽峰<sup>2</sup>, 张璇<sup>2</sup>

(1.宁夏地震局,宁夏 银川 750001; 2.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**以中国静止气象卫星 FY-2C/2E 红外遥感资料为依据,采用小波变换与功率谱相对变化法对 2014 年 10 月 7 日云南景谷  $M_s6.6$  地震进行震例数据处理和分析。结果显示:震前热异常具有明显时空特征,2014 年 8 月上旬震中及其周围区域出现热红外异常,异常区范围随时间逐渐扩大、幅度陡增;8 月 30 日左右异常面积达到最大,异常持续时间近一个月,异常幅度最大值达到平均值的 14 倍多,最大值 45 天后发生地震;该次地震热红外异常特征显著,容易识别,可作为一种识别地震热异常信息的判据,进一步验证卫星热红外异常在地震预判方面的作用。

**关键词:**云南景谷  $M_s6.6$  地震; 静止卫星; 热红外遥感; 相对功率谱; 亮温变化

**中图分类号:** P315.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2015)04-1007-06

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1007

## Thermal Infrared Anomaly Occurring before the Jinggu, Yunnan $M_s6.6$ Earthquake on October 7, 2014

LI Qing-mei<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-sheng<sup>2</sup>, LV Jun-qiang<sup>1</sup>, REN Jia-qi<sup>1</sup>, ZHANG Li-feng<sup>2</sup>, ZHANG Xuan<sup>2</sup>

1.Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750001, China;

2.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** To analyze the thermal infrared anomaly occurring before the Jinggu, Yunnan  $M_s6.6$  earthquake in China on October 7, 2014, remotely sensed infrared brightness temperature data obtained from the Chinese geostationary meteorological satellite FY-2C/2E is used for analysis. The wavelet transform is used to determine variations and progression of changes in the power spectrum. Thermal infrared anomalies are analyzed using a temporal evolution diagram of the earthquake and a timing curve of the average brightness temperature. Processing and analysis results show that in early August 2014, thermal anomalies occurring before the earthquake had obvious spatial and temporal characteristics. The epicenter and its surrounding area show thermal infrared anomalies that spread over time in a certain direction throughout the tectonic stress field with a sharp increase in the amplitude. On around August 30th, the anomalous amplitude reached a maximum, which persisted for almost one month at a maximum value of more than 14 times the average. The earthquake occurred 45 days after the appearance of the maximum value. Case analysis and history determines that the abnormal thermal evolution firstly appeared, enhanced before shrinking, and finally disappeared. The results of this study are consistent with those of other earthquakes and are considered to be related to the geological structure and underground environment of the epicenter. This study focuses on the thermal-infrared abnormality, its evolution, and features in relation to the formation of earthquakes and delivers a new understanding of

① 收稿日期:2014-08-20

作者简介:李青梅(1976—),女,甘肃兰州人,工程师,现主要从事地震监测及分析预报工作。E-mail:nxlqm\_2008@163.com。

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

the relationship between thermal anomalies and earthquake elements. Abnormal seismic thermal infrared characteristics are noted and identified and can be used as criteria for identifying subsequent seismic thermal anomalies. The thermal infrared anomaly characteristics of this earthquake are both remarkable and easy to identify and can be used as in the recognition of seismic thermal anomalies. However, the thermal infrared anomaly characteristics also have its own short board, that is it cannot identify and judge the three elements of earthquake well. In summary, the results of this study can be used in conjunction with future studies to further validate the effect of satellite thermal infrared anomalies in the prediction of earthquakes.

**Key words:** Jinggu  $M_s6.6$  earthquake in Yunnan Province; geostationary satellite; thermal infrared remote sensing; relative power spectrum; brightness temperature change

0 引言

2014 年 10 月 7 日云南景谷傣族彝族自治县发生  $M_s6.6$  强烈地震。地震宏观震中为  $23.4^{\circ} \text{N}$ ,  $100.5^{\circ} \text{E}$ (图 1), 宏观震中烈度为Ⅷ度, 震源深度 5

km, 属浅源地震, 震型为主震-余震型。地震发生在无量山断裂西支(普文断裂)北西延长线上, 主要受印度板块和欧亚板块两个地球上最活跃板块的强烈碰撞和挤压, 大量能量不断累积而诱发。

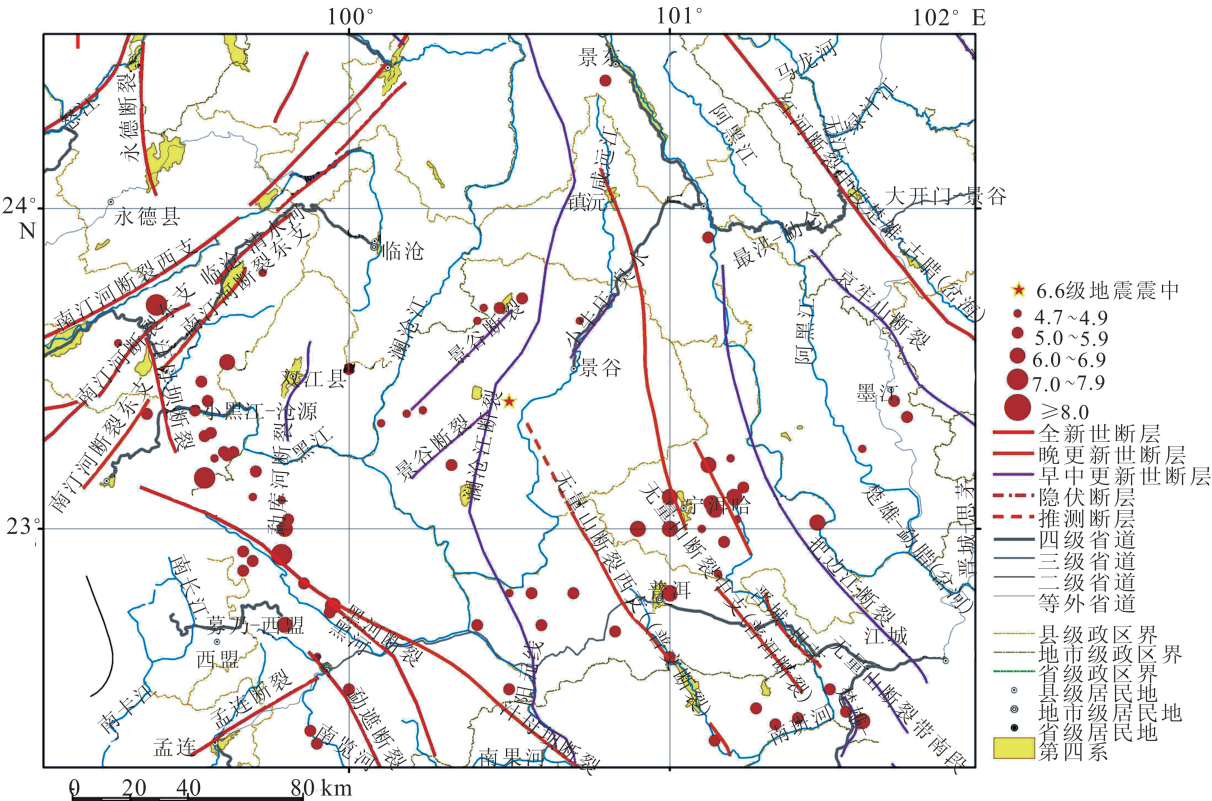


图 1 景谷  $M_s6.6$  地震区域地震构造图(据中国地震信息网)

Fig.1 Regional seismotectonic map of the Jinggu  $M_s6.6$  earthquake

针对地震预报研究这一当今世界性的科学难题, 各国地震专家相继开展了地球物理、地球化学、地壳形变等手段的观测研究, 但地面定点观测手段的局限性, 使人们无法获取大面积动态连续的地震前兆场信息, 制约了地震预报研究的发展。随着科学技术的不断发展, 大量的地震震例资料分析显示,

卫星红外遥感技术可以捕捉到某些强地震前有价值的信息。因此, 许多专家认为卫星热红外遥感技术是一种潜在的可用于地震短临预测的手段。

很多国家(包括中国)对卫星热红外遥感信息与地震的关系研究已经有很长时间, 并在地震热信息提取方法方面已取得进展。众多地震专家研究结果

显示:强震发生之前存在“热征兆”异常现象,是地震孕育过程中伴生的一种自然现象<sup>[1-24]</sup>。为了科学、有效地提取这些淹没在复杂背景中的地震弱信息,地震专家提出了许多种提取热红外异常的方法<sup>[13-14]</sup>。张元生等<sup>[24]</sup>采用不同于前人的方法,应用“时频相对功率谱法”和小波变换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地震热异常特征周期和特征幅值。本文应用该方法有效去除静止气象卫星热红外亮温数据非震因素的影响,进行震例研究。结果表明:景谷地震前确实存在热红外功率谱信息异常现象;结合震中区构造活动,研究异常随时间变化的分布特征、持续时间及异常区特征功率谱幅值。

## 1 数据处理方法

### 1.1 亮温计算

卫星热红外遥感仪器可直接观测到地物的热辐射强度,经定标处理和几何校正后可得到波段的辐射出射度,其公式为

$$B(\nu, T) = 2hc^2 \nu^3 (e^{hc/\nu kT} - 1)^{-1} \quad (1)$$

式中: $B(\nu, T)$ 是波数  $\nu$  (单位:  $\text{cm}^{-1}$ ) 和温度  $T$  (单位: K) 处的光谱辐射出射度 (单位:  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$ );  $h$  为普朗克常数;  $c$  为光速;  $k$  为玻耳兹曼常数。某一波段的黑体辐射公式是普朗克公式对这一波段各个波长值和该波段响应函数的积分,可以表达为:

$$W_i(T) = \frac{\int_{\nu_{1i}}^{\nu_{2i}} B(\nu, T) f_i(\nu) d\nu}{\int_{\nu_{1i}}^{\nu_{2i}} f_i(\nu) d\nu} \quad (2)$$

式中:  $i$  为波段数;  $f_i(\nu)$  为第  $i$  波段的波段响应函数;  $\nu_{1i}$  和  $\nu_{2i}$  分别是  $i$  波段的上、下限波长对应的波数。利用波数间隔  $\Delta\nu = 5 \text{ cm}^{-1}$  求和代替积分,则波段的黑体辐射公式可以表达为:

$$W_i(T) = \frac{\sum_{m_i} [B(\nu_{m_i}, T) f_i(\nu_{m_i}) \Delta\nu]}{\sum_{m_i} [f_i(\nu_{m_i}) \Delta\nu]} \quad (3)$$

式中:  $m_i = (\nu_{2i} - \nu_{1i}) / \Delta\nu$ 。应用式(3)在温度  $T_{1i} \sim T_{2i}$  范围内以  $\Delta T$  步长变化时,分别对每个红外波段进行数值积分,可得到每个波段( $i$ )的辐射出射度  $W_i(T)$  (单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ ) 与温度  $T$  的对应关系表。

卫星红外遥感波段观测数据,首先经数据辐射定标和几何校正可得到波段的辐射出射度,利用式(3)在  $T_{1i} \sim T_{2i}$  温度范围计算得到每个波段的辐射出

射度与温度的对应关系表,经过查表即可得到对应的黑体的辐射温度值,即亮温,用  $T$  表示(单位为 K)。

### 1.2 小波变换和相对功率谱估计

采用小波变换和相对傅氏功率谱法对选取的震前亮温数据进行处理。首先,采用小波变换去除亮温数据中的地球基本温度场和年变温度场(即舍去小波 7 阶的尺度部分),由于雨云和寒热气流引起的温度变化时间较短,一般为几小时至数天,这种信息经小波变换可基本去除,即舍去小波 2 阶的低通部分。小波变换处理过程即对每个像元用其 2 阶小波尺度部分减 7 阶尺度部分,相当于进行带通滤波。对每个像元而言,经过小波变换处理后的数据在时间域里是正负相间的亮温相对变化波形数据<sup>[24]</sup>。采用功率谱法获得各像元优势频率和幅值的时频空间数据,目的是为了研究地震前后热辐射变化功率谱与其他时段功率谱的异同。以  $n=64$  天为窗长、 $m=1$  天为滑动窗长做傅氏变换,计算其功率谱。对每个像元的时程数据滑动一次可获得一组功率谱,时间约定为窗内数据的起始时间,由此获得时频空间数据。其次,为比较地震前后功率谱的异同,对每一像元的所有功率谱做相对幅值处理,生成功率谱时频相对变化空间数据<sup>[6,23-24]</sup>。最后,进行全时空和全频段扫描,提取有用异常信息,分析可能的发震区域及异常变化特征。

## 2 景谷地震热异常现象

### 2.1 数据处理过程

应用中国静止气象卫星 FY-2C/2E 的远红外亮温数据。FY-2C 卫星和 FY-2E 卫星分别发射于 2004 年 10 月 19 日和 2008 年 6 月 15 日(2009 年 11 月 24 日替代 FY-2C 星,在取代过程中造成的数据丢失可用 D 星数据补失)。该卫星定点于  $105^\circ\text{E}$  赤道上空,距地面 35 000 多千米,星下点分辨率为 5 km,数据库范围为  $5^\circ \sim 50^\circ\text{N}$ ,  $55^\circ \sim 150^\circ\text{E}$ ,经纬度的步长均为  $0.05^\circ$ ,远红外两个波段分别为红外通道 1( $10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$ )和红外通道 2( $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ )。每 30 分钟或 1 小时对地球约三分之一面积观测一次,其观测精度高于极轨卫星,并且具有地点的可比性和时间的一致性,用于地震异常研究更具优势。

选用 2011 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日的的数据。为了减少太阳辐射的影响,选取每天午夜的观测数据,亮温数据的时间段为世界时(GMT) 17:00~21:00 这 5 个时次的观测数据(TBB 相当于黑体温度),用补窗法进行处理,得到已去除部分云

影响的亮温日值。应用小波变换方法去除地球基本温度场和年变温度场(即舍去小波 7 阶的尺度部分),去除雨云和寒热气流引起的温度场(即舍去小波 2 阶的低通部分)。对每个像元而言,经过小波变换处理后(即 2 阶小波尺度部分减 7 阶尺度部分)的数据在时间域里是正负相间的亮温相对变化波形数据(单位为℃),由于不便于对获得的大量数据进行全时空分析,郭晓等<sup>[6]</sup>用相对功率谱法计算可获得时频空间数据,并利用时频剖面图法进行全时空和全频段扫描,提取有用信息进行分析。

2.1 地震热红外变化过程及特征

2014 年 10 月 7 日云南景谷  $M_s6.6$  地震处于印度板块和欧亚板块的强烈碰撞和挤压带中。地震发生在无量山断裂带西支(普文断裂)北西延长线上,该断裂带北起无量山北麓,向南东经镇源、普洱、漫汤,顺营盘山入老挝,走向 NNW。自 1940 年以来

沿无量山断裂带已发生 6.0~6.9 级地震 8 次,表明该断裂带的地震活动非常活跃,是 6 级地震的多发区。此次地震震中位于 23.4°N,100.5°E,设定扫描分析地理范围为 20°~26°N,97°~103°E,通过相对功率谱时空演化图可以明显识别震前热红外异常。演化趋势如图 2:地震前二个月左右开始出现热红外异常,即 2014 年 8 月 8 日震区出现小面积异常区域(图 2 中绿色区域),异常范围随着时间推移逐渐向震中周围及以北逐渐扩大,在震源区形成不规则的形状;8 月 16 日左右异常区域渐趋于北-北东向延伸,8 月 30 日左右异常面积达到最大,震中位置始终位于异常区域红外谱值高值区域;震前 45 天左右异常面积达到最大后以很快的速度收缩。通过此次震例分析并结合历史震例发现,热异常演化过程是出现-增强-收缩-消失的过程,震中通常位于异常最集中区域或边缘部位。

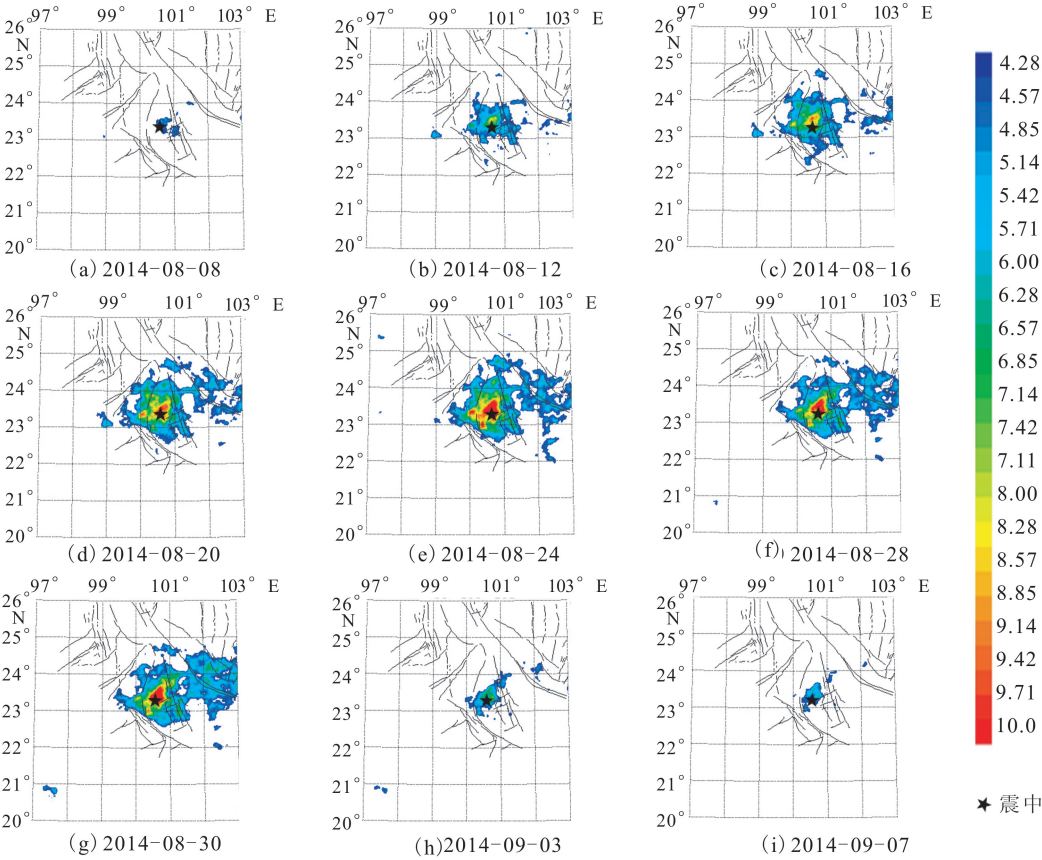


图 2 景谷  $M_s6.6$  地震前热红外相对功率谱异常时空演化图

Fig.2 The temporal-spatial evolution of thermal infrared anomalies before the Jinggu  $M_s6.6$  earthquake using relative power spectrum

2.2 地震热红外区域亮温平均值时间变化特征

震前异常区的平均谱值时间序列可反映异常区域热红外亮温的总体变化情况。分析该区域 4 年多

数据的平均值亮温变化得到以下特征(图 3):(1)该次地震引起的热异常特征周期约为 11 天,地震前 45 天左右特征功率谱幅值达到最大,约为平均值的

14 倍以上;(2)地震发生在异常峰值后的一段时间,与 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s8.0$  地震和 2008 年 3 月 21 日于田  $M_s7.3$  地震有所差别(汶川和于田地震都发生在异常时刻)<sup>[24]</sup>;(3)地震引起的热异常持

续时间在 30 天左右,震前 45 天左右异常完全消失,这与前期的研究结果一致<sup>[21,24]</sup>,即异常明显出现后的十几天至半年内是发震的可能时段。

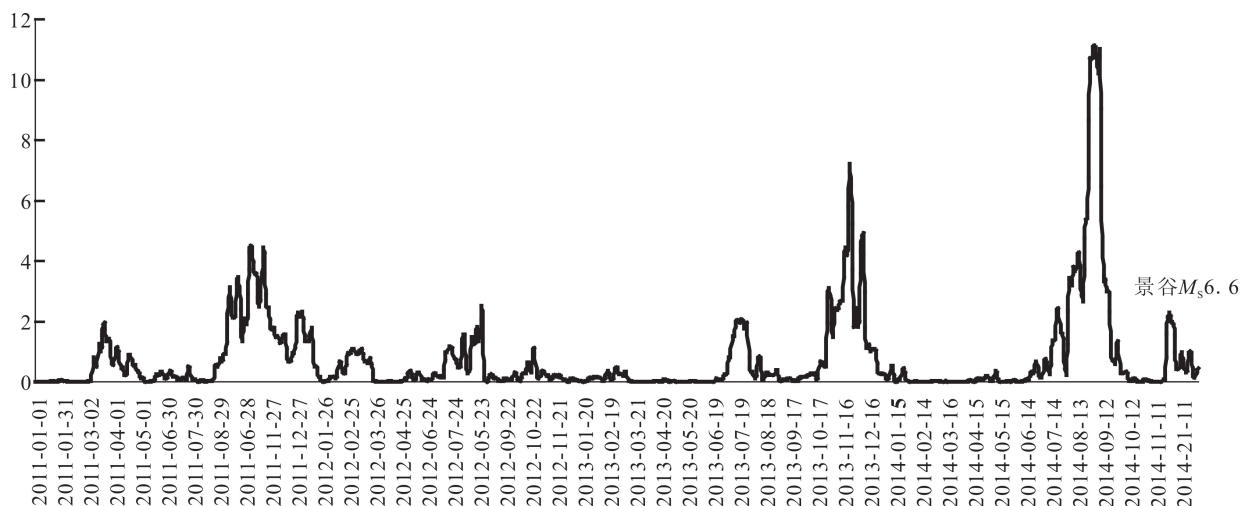


图 3 地震热红外异常时间序列曲线(区域范围为  $23.3^{\circ}\sim 23.4^{\circ}\text{N}$ ,  $100.4^{\circ}\sim 100.5^{\circ}\text{E}$ )

Fig.3 Time series curve of thermal infrared anomalies before the earthquake

### 3 结论与讨论

热红外异常时空演化图和异常区域时间序列曲线是分析判断地震热红外异常变化信息的依据。研究云南景谷  $M_s6.6$  地震热红外异常演化图和震中象元区域平均功率谱相对值时间序列曲线,发现云南景谷  $M_s6.6$  地震前出现了较明显的热红外亮温异常变化。从地震前热红外相对功率谱时空演化图中可以发现,震前约 60 天异常开始明显,异常范围变化基本过程是出现-扩展-收缩-消失;地震发生在异常区域,特征周期为 11 天,在热红外异常面积出现最大值 45 天后发生。异常区域分布特征和发震时间特征与前人的研究结果基本一致,即异常明显出现后的十几天至半年内,是发震的可能时段。对 2011 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日期间异常区功率谱相对值时序曲线的分析表明,异常区特征值幅最高达到平均值的 14 倍以上。

由于地震震例有限,地质环境、大气环境等条件的复杂性,该手段不能很好地识别和判断地震的三要素,但本次地震热异常的突出反应进一步验证了卫星热红外异常在地震判识方面的作用。

### 参考文献(References)

- [1] 徐秀登,强祖基,贻恭恭.临震卫星热红外异常与地面增温异常[J].科学通报,1991,33(4):291-294.  
XU Xiu-deng, QIANG Zu-ji, LIN Chang-gong. The Imminent

Satellite Thermal Infrared Anomalies and Ground Temperature Anomaly[J].Chin Sci Bul,1991,33(4):291-294.(in Chinese)

- [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.  
XU Xiu-deng, XU Xiang-min, MA Sheng-deng, et al. Primal Knowledge Why Atmosphere Temperature Increases Before Earthquake[J].Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(1): 123-127.(in Chinese)
- [3] Qiang Z J, Kong L C, Guo M H, et al. An Experimental Study on Temperature Increasing Mechanism of Satellitic Thermo-infrared[J].Acta Seismol Sin,1997,10(2):247-252.
- [4] 强祖基,徐秀登,贻恭恭.卫星热红外异常-临震前兆[J].科学通报,1990,35(17):1324-1327.  
QIANG Zu-ji, XU Xiu-deng, LIN Chang-gong. Satellite Thermal Infrared Anomalous Earthquake Imminent Precursor[J].Chin Sci Bul,1990,35(17):1324-1327.(in Chinese)
- [5] 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.  
LIU De-fu, PENG Ke-yin, LIU Wei-he, et al. Thermal Omens before Earthquake [J].Acta Seismologica Sinica,1999,12(6):710-715.(in Chinese)
- [6] 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.  
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)
- [7] 康春丽,刘德富,荆凤,等.大地震热红外辐射异常信息时空特征分析[J].地球物理学进展,2011,26(6):1897-1905.

- KANG Chun-li, LIU De-fu, JING Feng, et al. Study on the Indication of Infrared Radiation Prior to Impending Strong Earthquakes[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(6): 1897-1905. (in Chinese)
- [8] 陈梅花, 邓志辉, 马晓静. 断裂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.
- CHENG Mei-hua, DENG Zhi-hui, MA Xiao-jing. 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)
- [9] Gabrielov A, Zaliapin I, Newman W I, et al. Colliding Cascades Model for Earthquake Prediction[J]. Geophys J Int, 2000, 143(2): 427-437.
- [10] 徐秀登, 徐向民. 地震前红外异常的基本特征与成因机制[J]. 西北地震学报, 2001, 23(3): 310-312.
- XU Xiu-deng, XU Xiang-min. The Basic Characters and Formation Mechanism of Satellite Infrared Anomalies before Strong Earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(3): 310-312. (in Chinese)
- [11] 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 Xinjing-Qinghai Border Ms8.1 Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, 24(1): 1-4. (in Chinese)
- [12] 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.
- DENG Zhi-hui, WANG Yi, CHEN Mei-hua, et al. Satellite Infrared Anomaly of Several Strong Earthquakes in China Mainland[J]. Seismology and Geology, 2003, 25(2): 327-337. (in Chinese)
- [13] 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(2): 113-117.
- ZHANG Yuan-sheng, GUO Xiao, ZHANG Xiao-mei, et al. Study on the Inversion Method of Land Surface Temperature by Applying IR bright Temperature Data of Still Satellite[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26: 113-117. (in Chinese)
- [14] 强祖基, 马蒿乃, 曾佐勋, 等. 卫星热红外地震短临预测方法研究[J]. 地学前沿, 2010, 17(5): 254-262.
- QIANG Zu-ji, MA Ai-nai, ZENG Zuo-xun, et al. A Study of the Method of Satellite Thermal Infrared Earthquake Prediction in Imminence [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 254-262. (in Chinese)
- [15] 郭卫英, 单新建. 应用多种遥感影像处理方法提取玛尼 7.5 级地震中的热红外异常信息[J]. 内陆地震, 2005, 19(2): 55-59.
- GUO Wei-ying, SHAN Xin-jian. Using Many Remote Sensing Image Processing Methods to Choose The Seismic Thermal Infrared Anomaly Informations of Mani M7.5 Earthquake[J]. Inland Earthquake, 2005, 19(2): 55-59. (in Chinese)
- [16] 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.
- ZHONG Mei-jiao, ZHANG Yuan-sheng. Satellite Infrared Anomaly before Pakistan Ms7.8 Earthquake, October 8, 2005 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(2): 137-140. (in Chinese)
- [17] 郭晓, 张元生, 钟美娇. 卫星热红外遥感资料在地震预报中的应用研究[J]. 西北地震学报, 2005, 27(3): 223-227.
- GUO Xiao, ZHANG Yuan-sheng, ZHONG Mei-jiao. Study on Thermal Infrared Data of Satellite Remote Sensing Applied to Earthquake Prediction[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(3): 223-227. (in Chinese)
- [18] 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.
- GUO Wei-ying, SHAO Xin-jian, QU Chun-yan. Correlation between Infrared Anomalous and Earthquakes in Tarim Basin [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(5): 736-741. (in Chinese)
- [19] 屈春燕, 单新建, 马瑾. 红河断裂高温条带的成因及其与地震活动性的关系探讨[J]. 地震学报, 2008, 28(1): 91-97.
- QU Chun-yan, SHAN Xin-jian, MA Jing. Formation Cause of Thermal Infrared High Temperature Belt Along Honghe Fault and Its Relation to Earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 28(1): 91-97. (in Chinese)
- [20] Saraf A k, Rawat P, et al. Satellite Detection of Earthquake Thermal Infrared Precursors in Iran [J]. Nature Hazard, 2008, 47: 119-135.
- [21] 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.
- ZHANG Yuan-sheng, GUO XIAO, WEI Cong-xin, et al. The Characteristics of Seismic Thermal Radiation of Japan Ms9.0 and Myanmar Ms7.2 Earthquake [J]. Chinese J Geophys. 2011, 54(10): 2575-2580. (in Chinese)
- [22] 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.
- ZHANG Xuan, ZHANG Yuan-sheng, WEI Cong-xin, et al. Thermal Infrared Anomaly before Yiliang of Yunnan Ms5.7 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 171-176. (in Chinese)
- [23] 魏从信, 张元生, 惠少兴. 2009 年 8 月 11 日安达曼群岛 Ms7.5 地震热红外变化[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 41-45.
- WEI Cong-xin, ZHANG Yuan-sheng, HUI Shao-xing. Thermal-infrared Variation of Andaman Islands Ms7.5 Earthquake on August 11, 2009 [J]. Journal of Seismological Research, 2011, 34(2): 41-45. (in Chinese)
- [24] 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.
- ZHANG Yuan-sheng, GUO Xiao, ZHONG Mei-jiao, et al. Wenchuan Earthquake: Brightness Temperature Changes from Satellite Infrared Information[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(3): 904-910. (in Chinese)