

台湾恒春地震前的卫星热红外异常特征及其机理

刘善军¹, 吴立新^{1,2}, 李金平², 董彦卿², 马保东¹

1. 东北大学 3S 与数字矿山研究所, 沈阳 110004

2. 中国矿业大学 3S 与沉陷工程研究所, 北京 100083

[摘要] 构造地震前卫星热红外异常是国际地震界与遥感界的共同研究热点。分析 2006 年 12 月 26 日台湾恒春 7.2 级地震前出现的卫星热红外异常现象, 其特征表现为: 震前 6 d 在菲律宾东部太平洋海域出现片状热异常, 并不断向西迁移; 震前 2 d 到达菲律宾; 之后沿马尼拉海沟转为北上, 并由远到近、逐渐向震中迁移, 同时异常的强度及范围逐渐扩大; 临震前 1 d 达到高峰, 升温幅度约 10℃。结合该震区构造背景, 对此次卫星热红外异常与构造活动的关系进行了分析, 表明震前红外异常的出现及其时空演化受构造活动控制显著。利用已有遥感-岩石力学基础实验结果, 对震前红外异常的产生机制进行了讨论, 提出震前构造应力场的迁移与集中活动所激发与加剧的应力热与地热的传递, 及其与孕震区温室效应的叠加, 是此次地震卫星热红外异常产生的主要机理。

[关键词] 台湾地震; 热红外异常; 机理; 遥感-岩石力学; 卫星遥感

[中图分类号] P315.72

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)06-0032-06

Features and Mechanisms of the Satellite Thermal Infrared Anomaly before Hengchun Earthquake in Taiwan Region

LIU Shanjun¹, WU Lixin^{1,2}, LI Jinping², DONG Yanqing², MA Baodong¹

1. Institute for GIS/RS/GPS and Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China

2. Institute for GIS/RS/GPS and Subsidence Engineering Research, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: Thermal infrared anomaly before tectonic earthquake is a much studied topic related with seismology and remote sensing. In this paper, the thermal infrared anomaly before the Hengchun earthquake (Dec. 26, 2006, Ms=7.2) in Taiwan region is analyzed. The results show that the anomaly has the following features: ① a thermal infrared anomaly area appeared on the east of Philippines six days before Hengchun earthquake, and it gradually moved toward west; ② the anomaly moves to Philippines two days before shocking; ③ then the anomaly changed its moving direction from westward to northward, the anomaly became gradually close to the epicenter, and the strength as well as the scope of the anomaly region became more and more larger; ④ the strength of the anomaly reached the peak one day before shocking, and the brightness temperature increased by about 10℃. The relationship between the thermal anomaly and the tectonic activity of Taiwan region is also studied. The results indicate that the satellite thermal anomaly before Hengchun earthquake is evidently controlled by the tectonic activity of Taiwan region. It is suggested that the overall action of the out-going stress heating effect and the geothermal and the greenhouse effect initiated and amplified by the movement and concentration of crustal stress field in the seismogenic zone is the chief mechanism of satellite thermal anomaly before Hengchun earthquake.

Key Words: Taiwan earthquake; thermal infrared anomaly; mechanism; remote sensing-rock mechanics; satellite remote-sensing

CLC Number: P315.72

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)06-0032-06

收稿日期: 2007-02-14

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50525414), 东北大学 985 建设与长江学者创新平台项目

作者简介: 刘善军, 男, 沈阳市和平区文化路 3 号东北大学 3S 与数字矿山研究所, 教授, 主要从事遥感-岩石力学及地震遥感分析研究; E-mail: liusjdr@126.com

0 引言

中强以上构造地震发生前的卫星热红外异常现象早已为国内外所注意。自 1988 年前苏联学者 Gorny 等^[1]报道了在中亚及东地中海地区的许多中强地震前出现大面积卫星热红外(10.5~12.5 μm)异常现象之后,强祖基等^[2]、Tronin^[3]、李茂玮等^[4]、孔令昌等^[5]、刘德富等^[6]、吕琪琦等^[7]、徐秀登等^[8]、Ouzounov 等^[9]、Tramutoli 等^[10]、Arun 等^[11]、马瑾等^[12]分别对中亚、西亚、环太平洋地区和中国境内若干中强以上构造地震发生前的卫星热红外异常现象进行了分析研究,主要结论有:①震中附近震前 30 d 内出现圆、椭圆、带及块状的高温异常区域,震前 1~2 d 达到高峰,震后很快消失;②异常区的温度一般比周围高 2~6℃;③异常位置与构造关系密切,随地震临近,异常区逐渐向震中迁移和扩展;④异常面积和升温幅度与震级存在一定的正相关性。

有关震前卫星热红外异常的形成机理,国内外许多学者进行过研究探讨,但迄今无定论。主要观点有:①断层蠕动摩擦生热导致震前热异常^[13];②震前地球放气产生温室效应及电场激发增温效应,即所谓的气热说^[2,14~15];③震前地下流体上升导致热气的溢出造成热异常^[1];④震前应力集中致热并通过地壳裂隙传递至地表产生热异常^[16];⑤震前应力集中导致“P-hole”电荷向地面传递,在地表重新结合释放能量导致热异常^[17];⑥震前近地表的空气受 α 辐射发生电离导致大气中的水蒸气浓缩,从而释放热^[18]。

总体看来,强震前卫星热红外异常现象是不容置疑的科学事实,但其形成机理、演变规律及其与地震时空强 3 参数的定量关系尚有待深入研究。自然现象的每一次发现和分析理解,都是对自然规律及其正确认知的一次逼近。本文针对 2006 年 12 月 26 日台湾恒春地震震前的卫星热红外异常现象,对此次地震卫星热红外异常的空间分布及时空演化规律进行分析,并结合台湾地区构造活动特征和遥感-岩石力学基础实验结果进行机理探讨。

1 台湾恒春震前卫星热红外异常特征

中国台湾地区位于菲律宾板块、南海亚板块和欧亚板块的交会部位,特殊而复杂的构造应力环境导致台湾成为中国多震地区,每年都会有中强甚至大震发生。2006 年 12 月 26 日 20 时 26 分在台湾恒春(北纬 21.9°,东经 120.6°)发生里氏 7.2 级地震,造成数人死亡、几十人受伤。更为严重的是,地震将中国大陆通往海外的海底通讯光缆破坏中断,导致近 5 周的国际网络不能畅通。过去就台湾地震前的热红外异常现象,曾进行过一些研究^[5,8],证实震中附近海域存在震前增温热异常;但多为现象特征描述,对其形成机制及控制因素很少讨论或讨论不足。

1.1 热像异常的时空演变特征

本文所使用的卫星红外数据来自风云 2C 卫星的热红外第一波段(10.3~11.3 μm),该波段反映了下垫面的热状态(物理温度)。对震前两个月(2006 年 11~12 月)的 FY-2C 卫星亮温图像的分析处理发现以下特征和规律。

1.1.1 震前 6 d 热像异常的迁移特征

震前 6 d(12 月 20 日)开始,在菲律宾岛东部太平洋区域出现大面积的卫星热像异常。图 1 所示为 12 月 20~25 日的卫星红外亮温分布图,由于 12 月 20~25 日菲律宾岛东部太平洋区域云的分布较少,因此图 1 红色区域分布的变化较真实反映了海面异常温度场的变化。从 20 日的图像看,异常范围大约分布在(北纬 0°~25°、东经 125°~145°),异常的西端在菲律宾附近;21 日(震前 5 d)开始,异常逐渐向西发生移动,同时,异常的重心也随之迁移;到 22 日 0 时(北京时间,下同),异常的前端越过菲律宾,到达了巴拉望岛,异常的重心迁至北纬 10°、东经 110°附近;而到 25 日 0 时,异常的重心已迁至菲律宾。上述图像中热温度场的迁移方向与太平洋板块的北西向活动的方向一致。

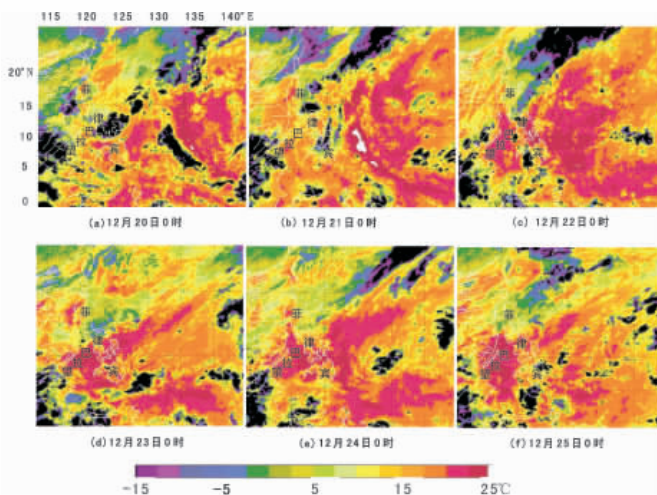


图 1 震前 6 d 的卫星热红外图像的演化特征

Fig. 1 Evolution features of satellite thermal infrared images six days before shaking

1.1.2 震前及震后 2 d 热像异常的演变特征

从 12 月 25 日开始,当热像异常迁移到菲律宾岛后,稍做停留即改变原迁移方向,转而沿马尼拉海沟及台湾西南的北东向构造向北迁移。图 2 所示为震前 1 d 至震后 2 d(25~28 日)的卫星热红外图像,反映 3 个特点。

1)震前 40 h(25 日 4 时)至临震前 0.5 h(26 日 20 时),异常区亮温持续上升;25 日 20 时,高温中心(位于北纬 15°、东经 118°)亮温达 24℃,比一天前同一时间的亮温高出 5℃左右。

2) 震前 40 h 至临震前, 高温异常区呈扩大趋势: 25 日 4 时, 异常主要局限在菲律宾西南部一带, 面积约 25 万 km^2 ; 震前 0.5 h 异常面积显著扩大为原来的 4 倍左右。

3) 随着地震的临近, 异常位置逐渐向震中位置迁移: 25 日 4 时, 异常位于菲律宾西南部一带, 此后异常逐渐向北迁移; 25 日 12 时, 在菲律宾西部以及台湾西南部, 出现块状及条带状的分散高温异常区域。值得注意的是, 此时在台湾南部震中位置出现了较大面积 (约 6 000 km^2) 的高温异常, 温度比周围区域高出近 2°C 。此后, 分散的异常区域逐渐连接成片, 并向北部迁移, 直逼震中。

4) 异常区的空间位置与南海地质构造存在对应关系: 带状的异常以及片状异常都呈现北东向展布, 在空间位置上与南海区域的北东向构造 (断层及构造盆地) 吻合; 而异常的迁移则是沿马尼拉海沟进行的, 表明构造对异常的分布及发展具有控制作用。

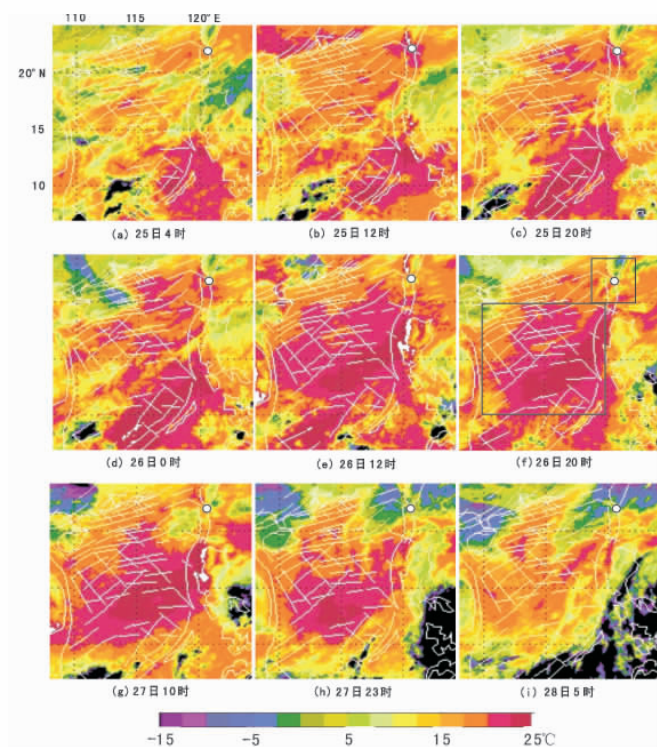


图 2 震前 1 天的卫星热红外图像的演化特征 (小圆圈为震中, 白线为地域边界及构造线, 黑点线为经纬线, 黑实线方形框为温度分析区域)

Fig. 2 Evolution features of satellite thermal infrared images one day before shocking

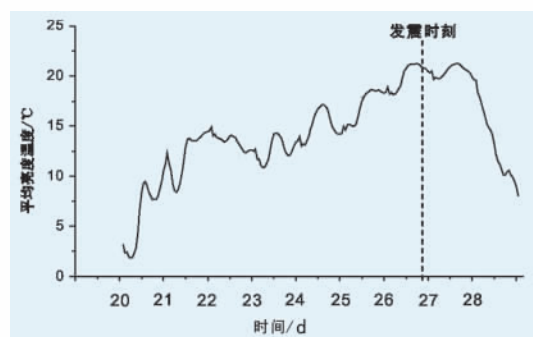
1.2 温度异常的时序变化特征

热像异常能反映震前热异常的空间分布及其演化特征, 而要了解温度异常随时间的变化特征则需借助定量分析手段。为此, 对异常域圈定某一几何范围, 定量分析该区红外亮温指标——最高亮度温度和平均亮

度温度 (由于局部受云的干扰未对最低亮度温度进行分析) 随时间的变化特征。

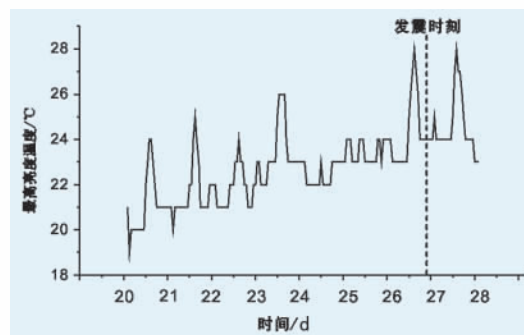
1.2.1 孕震区温度异常的时序变化特征

以发震时异常区的空间分布为基准, 圈定一方形区域 (北纬 $10^\circ\sim 20^\circ$ 、东经 $110^\circ\sim 120^\circ$, 见图 2 中 26 日 20 时图像中的大方框), 分析该区震前 6 d 至震后 2 d 的最高亮度温度和平均亮度温度随时间的变化特征, 如图 3 所示。可见, ① 从 20 日 0 点开始, 随地震临近, 异常区的亮度温度 (平均温度和最高温度) 呈上升趋势; ② 平均温度在震前的 4~7 h (26 日 13~16 时) 达到高峰, 比 20 日同一时间高出 11.5°C , 比 24 日的同一时间高出 4.2°C ; ③ 最高温度在震前的 7 h (26 日 13 时) 达到高峰, 比 20 日同一时间高出 7.1°C , 比 24 日的同一时间高出 4°C 。



(a) 平均亮温的时序变化

(a) Variation of average brightness temperature with time



(b) 最高亮温的时序变化

(b) Variation of maximum brightness temperature with time

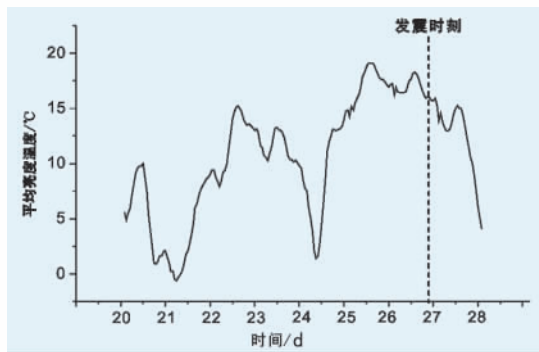
图 3 异常区亮温的时序变化曲线

Fig. 3 Temporal features of brightness temperature inside the abnormal region

在 26 日 20 时 26 分主震发生后, 14 h 内连续发生了 4 次余震 (分别为 26 日 20 时 34 分的 M_s 6.7、26 日 23 时 41 分的 M_s 5.0、27 日 01 时 35 分的 M_s 5.0、27 日 10 时 30 分的 M_s 5.3)。由于余震活动, 导致主震发生后异常区域的温度依然居高不下, 一直持续到 27 日中午。从最后一次余震发生之后 4.5 h (27 日 15 点) 开始, 温度才快速下降, 迅速回落到震前 23 日的水平。

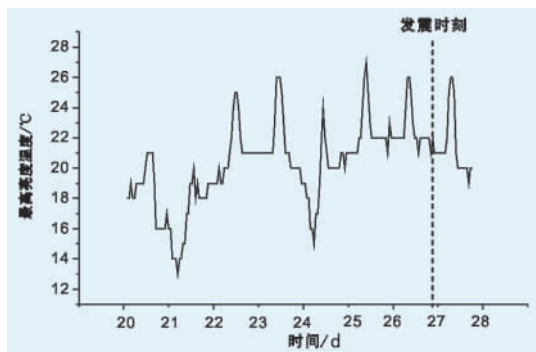
1.2.2 震中温度异常的时序变化特征

为了解震中附近的亮温变化,对震中附近圈定一方形小区域(北纬 20~24°、东经 118~122°,见图 2 中 26 日 20 时图像中的小方框),分析震前 6 d 到震后 2 d 的最高亮温和平均亮温随时间的变化特征,如图 4 所示。可见,两种亮温指标的变化与图 3 相似,只是震中附近亮温在震前 1 d(25 日 21 点)就已达到最高峰,并非如图 3 所示震前几小时才达到高峰,表明震中亮温异常在震前 1 d 转入了回落平静期,是短临发震前兆。



(a) 平均亮温的时序变化

(a) Variation of average brightness temperature with time



(b) 最高亮温的时序变化

(b) Variation of maximum brightness temperature with time

图 4 震中附近亮温的时序变化曲线

Fig. 4 Temporal features of brightness temperature near epicenter

2 震前红外异常机制分析

2.1 震前红外异常与构造活动的关系

从大地构造背景来看,中国台湾地区位于欧亚板块、菲律宾板块及南海亚板块之间的交会部位,如图 5 所示。菲律宾板块以北西向向欧亚板块俯冲,在两个板块的交界处形成板间构造——琉球海沟、琉球岛弧和冲绳海槽。在台湾岛的西南部,南海亚板块以北东向向菲律宾板块俯冲,在二者交界处形成板间构造——马尼拉海沟和吕宋火山弧。台湾岛处于菲律宾板块向欧亚板块的俯冲以及向南海亚板块仰冲的转换部位,由

于构造的复杂性及运动的特殊性,使得该区成为构造应力集中和构造地震的高发区。

恒春地震震前卫星红外异常的迁移路线如图 6 所示。可见该迁移路线与台湾地震特有的构造动力学特征一致,即台湾地震往往是当菲律宾板块向西挤压并与南海亚板块和欧亚板块相遇受阻后发生的。遥感-岩石力学基础实验研究^[16,19-26]揭示,无论岩石在破裂前还是在黏滑过程中均会出现不同程度的热红外异常现象,且红外异常的出现及其时空演化受控于微破裂及构造面的摩擦滑动过程,表明岩石受力及灾变过程产生的热力耦合效应受构造活动控制。马瑾等^[12]利用卫星热红外信息进行南北地震构造带的研究中也揭示卫星热红外信息能反映断层的关联活动。

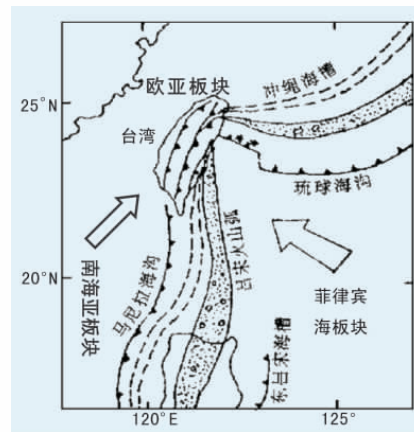


图 5 台湾及周边区的大地构造背景

Fig. 5 Tectonic background of Taiwan region and nearby

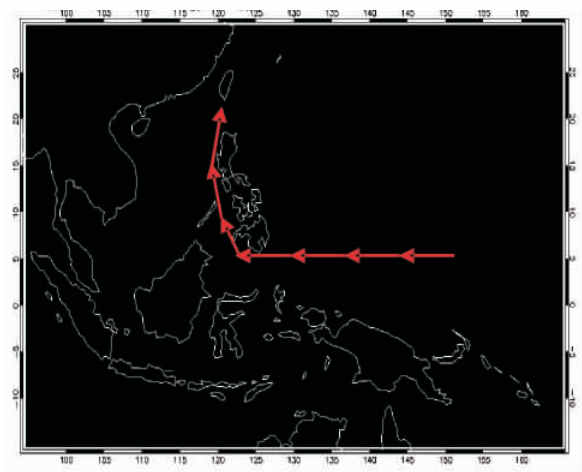


图 6 震前红外异常的迁移路线

Fig. 6 Movement route of infrared abnormal before shocking

据此,对恒春地震前的地震动力学特点进行如下推测:首先,太平洋板块向西挤压,构造应力场逐渐向西传递,其集中部位向西迁移,导致温度场发生相应迁

移;当挤压作用传递到菲律宾板块并使其以北西向与南海亚板块发生交接后,促使构造应力场传递方向发生改变,转而沿两个板块的交接部位——马尼拉海沟附近由南向北传递;最终,应力场在台湾南部的发震部位受阻,产生高应力集中,并最终引发地震。恒春地震前的卫星红外异常的时空演化,实际上就是上述应力场迁移变化的一种应力热效应及其附加效应的综合结果。

2.2 震前红外异常产生的机理

遥感-岩石力学基础实验研究表明,无论岩石破裂还是摩擦滑动都会产生热力耦合效应,从而引起红外辐射。然而,实验室的研究结果并不能说明地下深处震源的应力热与地热是如何传递到地表并造成地表亮度温度异常的。众所周知,岩石是不良的热导体,地壳深部因孕震作用产生的热能,单独依靠岩石的热传递而传至地表并造成热异常几乎不可能。要使地下热到达地表必须有两个基本条件:一是必须具备传热通道;二是必须有传热介质。由于地壳岩石是一种富含断层、节理、裂隙、空洞等缺陷的不连续介质,这些缺陷将地壳分割、破坏成千疮百孔而能够透水、透气。地壳因此能“呼吸”(如地表水能渗入地下成为地下水,地下热能以温泉的形式涌出等),而成为固液气三相耦合介质。此外,孕震过程中随着震源附近应力的加剧及一系列小震的发生,地壳岩石会产生许多微破裂和宏观裂隙,进一步增强和激活了传热通道;而地壳岩石及通道中富集的 H_2O , CO_2 , CO , CH_4 等气(汽)或液体,自然成为地下热传递的重要介质。两个基本条件得到满足,使得地下深处应力热与地热源加剧传至地表,使地表的温度升高并产生热红外异常成为可能。

此外,震前地壳岩石及通道中富集的高浓度温室气体溢出产生的温室效应,以及在突变电场作用下产生的热效应等对热异常产生起推动作用,也应是卫星热红外异常产生的重要原因。观测表明,震前和发震时常出现沿断裂带或地裂缝释出高浓度的温室气体的现象^[14]。许多研究也表明震前中国南海区域的天然气浓度会增高^[27]。这些气体在自身辐射和太阳光照作用下,会产生温室气体效应,使地表温度升高。

因此,震前构造应力场的迁移与集中活动所激发与加剧的应力热与地热的传递,及其与孕震区温室效应的叠加,是此次地震卫星热红外异常产生的主要机理。

参考文献(References)

- [1] GORNY V I, SALMAN A G, TRONIN A A, *et al.* The earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. Proc Acad Sci USSR, 1988, 301: 67-69.
- [2] 强祖基, 孔令昌, 王弋平, 等. 地球放气、热红外异常与地震活动[J]. 科学通报, 1992, 37(24): 2259-2262.
- QIANG Zuj, KONG Lingchang, WANG Yiping, *et al.* Earth gas releasing, thermal infrared anomaly and seismic activity [J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37 (24): 2259-2262.
- [3] TRONIN A A. Satellite thermal survey: A new tool for the study of seismically active regions[J]. Int J Remote Sensing, 1996, 17(8): 1439-1455.
- [4] 李茂玮, 扬忠东. 卫星遥感资料在地震预报中的应用研究(以1991年柯坪6.5级地震为例)[J]. 内陆地震, 1996, 10(4): 296-303.
- LI Maowei, YANG Zhongdong. Study on application of infrared data of satellite remote sensing to earthquake prediction explained through an example of Keping Ms=6.5 earthquake in 1991[J]. Inland Earthquake, 1996, 10 (4): 296-303.
- [5] 孔令昌, 强祖基. 台湾海峡7.3级强震前的热红外增温异常[J]. 地震学刊, 1997(3): 34-37.
- KONG Lingchang, QIANG Zuj. Anomaly of thermal infrared increase temperature before Taiwan strait earthquake of Ms7.3[J]. Journal of Seismology, 1997(3): 34-37.
- [6] 刘德富, 罗灼礼, 彭克银. 强烈地震前的OLR异常现象[J]. 地震, 1997, 17(2): 126-132.
- LIU Defu, LUO Zhuoli, PENG Keyin. OLR anomalous phenomena before strong earthquakes [J]. Earthquake, 1997, 17(2): 126-132.
- [7] 吕琪琦, 丁鉴海, 崔承禹, 等. 张北6.2级地震前的卫星热红外异常地震[J]. 地震, 1998, 18(3): 240-244.
- LU Qiqi, DING Jianhai, CUI Chengyu, *et al.* Satellite thermal infrared anomaly before the Zhangbei earthquake Ms=6.2[J]. Earthquake, 1998, 18(3): 240-244.
- [8] 徐秀登, 徐向民, 王煜. 台湾南投7.6级地震前卫星红外异常[J]. 地震学报, 2000, 22(6): 666-669.
- XU Xiudeng, XU Xiangmin, WANG Yu. Satellite infrared anomaly before Nantou Ms=7.6 earthquake in Taiwan, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(6): 666-669.
- [9] OUZOUNOV D, BRYANT N, LOGAN T, *et al.* Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999-2003[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31: 154-163.
- [10] TRAMUTOLI V, CUOMOB V, FILIZZOLA C, *et al.* Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (Izmit) earthquake, August 17, 1999 [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96: 409-426.
- [11] ARUN K S, SWAPNAMITA C. Thermal remote sensing technique in the study of pre-earthquake thermal anomalies[J]. J Ind Geophys Union, 2005, 9(3): 197-

- 207.
- [12] 马瑾, 陈顺云, 刘培洵, 等. 用卫星热红外信息研究关联断层活动的时空变化——以南北地震构造带为例. 地球物理学报[J]. 2006, 49(3): 816–823.
MA Jin, CHEN Shunyun, LIU Peixun, *et al.* Temporal – spatial variations of associated faulting inferred from satellite infrared information: A case study of the N–S seismo–tectonic zone in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 816–823.
- [13] 蔡永恩. 地震前断层蠕动与地温异常的探讨[J]. 地震学报, 1987, 10(2): 165–174.
CAI Yongen. Discussion on fault creeping and geothermal anomaly before earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 1987, 10(2): 165–174.
- [14] 强祖基, 孔令昌, 郭满江, 等. 卫星热红外增温机制的实验研究[J]. 地震学报, 1997, 19(2): 197–201.
QIANG Zuji, KONG Lingchang, GUO Manhong, *et al.* An experimental study on temperature increasing mechanism of satellitic thermo –infrared [J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(2): 197–201.
- [15] TRONIN A A. Satellite thermal survey application for earthquake prediction[M]. Terra Sci Publ, Tokyo, Japan, 1999: 717–746.
- [16] 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 Naiguang, YU Ping, DENG Mingde, *et al.* The simulated experimental studies on cause of thermal infrared precursor of earthquakes[J]. Earthquake, 1998, 18(1): 83–88.
- [17] FREUND F T. Rocks that crackle and sparkle and glow: strange pre–earthquake phenomena[J]. Journal of Scientific Exploration, 2003, 17: 37–71.
- [18] PULINETS S A, OUZOUNOV D, KARELIN A V, *et al.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31: 143–153.
- [19] 吴立新, 刘善军, 吴育华, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 24–30.
WU Lixin, LIU Shanjuan, WU Yuhua, *et al.* Remote sensing–rock mechanics (I)——Laws of thermal infrared radiation from fracturing of discontinuous jointed faults and its meanings for tectonic earthquake omens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 24–30.
- [20] 吴立新, 刘善军, 吴育华, 等. 遥感–岩石力学 (II)——断层双剪粘滑的热红外辐射规律及其构造地震前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 192–198.
WU Lixin, LIU Shanjuan, WU Yuhua, *et al.* Remote sensing–rock mechanics (II)——Laws of thermal infrared radiation from viscosity–sliding of bi–sheared faults and its meanings for tectonic earthquake omens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 192–198.
- [21] 吴立新, 刘善军, 许向红, 等. 遥感–岩石力学 (III)——交汇断层粘滑的热红外辐射与声发射规律及其构造地震前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 401–407.
WU Lixin, LIU Shanjuan, XU Xianghong, *et al.* Remote sensing–rock mechanics(III)——Laws of thermal infrared radiation and acoustic emission from friction sliding intersected faults and its meanings for tectonic earthquake omens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 401–407.
- [22] 吴立新, 刘善军, 吴育华, 等. 遥感–岩石力学 (IV)——岩石压剪破裂的热红外辐射规律及其地震前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 539–544.
WU Lixin, LIU Shanjuan, WU Yuhua, *et al.* Remote – sensing–rock mechanics (IV)——Laws of thermal infrared radiation from compressively–sheared fracturing of rock and its meanings for earthquake omens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 539–544.
- [23] WU Lixin, LIU Shanjuan, WU Yuhua, *et al.* Precursors for rock fracturing and failure–Part I: IRR image abnormalities. Int J Rock Mech Mining Sci, 2006, 43(3): 473–482.
- [24] WU Lixin, LIU Shanjuan, WU Yuhua, *et al.* Precursors for rock fracturing and failure–Part II: IRR T–Curve abnormalities [J]. Int J Rock Mech Mining Sci, 2006, 43 (3): 483–493.
- [25] 刘善军, 吴立新, 吴育华, 等. 遥感–岩石力学 (V)——岩石粘滑过程中红外辐射的影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 730–750.
LIU Shanjuan, WU Lixin, WU Yuhua, *et al.* Remote sensing–rock mechanics (V)——Analysis on the factors affecting thermal infrared radiation in process of rock viscosity sliding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 730–750.
- [26] 吴立新, 刘善军, 吴育华. 遥感–岩石力学引论: 岩石受力灾变的红外遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
WU Lixin, LIU Shanjuan, WU Yuhua. An introduction to remote sensing–rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [27] 卢振权, 强祖基, 吴必豪. 南海临震前卫星热红外增温异常原因初探[J]. 地球学报, 2002, 23(1): 42–46.
LU Zhenquan, QIANG Zuji, WU Bihao. A tentative interpretation of the formation of high temperature anomaly in satellite based thermal infrared scanning images(STISI) of the South China Sea before earthquake [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(1): 42–46.

(责任编辑 王士泉)