

# 1998年广西环江 $M_s$ 4.9 地震前 卫星热红外异常分析\*

文翔<sup>1</sup>, 周斌<sup>1,2</sup>, 阎春恒<sup>1</sup>, 毕熙荣<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区地震局, 广西 南宁 530022; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 收集了1998年2~5月广西环江  $M_s$  4.9 地震震区连续的 NOAA/AVHRR 卫星遥感热红外资料, 经过过去云等数据处理, 选取当地夜间时段的热红外数据进行地表温度反演, 分析地震前、后地表温度异常时间演化过程及其异常空间分布与活动断裂关系, 并讨论了震区地形地貌、季节性气候等非构造因子对地温异常的影响。结果表明: (1) 在环江  $M_s$  4.9 地震发生前2个月震中附近出现热红外异常增温现象, 异常增温与发震时间有一定对应性。显著增温主要表现在震前半个月左右, 震后温度逐步下降; (2) 对地形地貌、季节性气候等非构造因子进行相关分析表明, 环江  $M_s$  4.9 地震反映出反季节变化的震前构造“增温”信息; (3) 异常升温由震中沿 NW 与 NE 向共轭断裂交叉发育, 与此次环江地震 NW 向发震构造较为一致。充分考虑地形地貌、季节性气候等非构造因素对异常升温的影响, 认为此次环江  $M_s$  4.9 地震前热红外升温可能为震前短临异常现象。

**关键词:** 环江  $M_s$  4.9 地震; 地表温度; 地形地貌; 季节变化; 前兆异常

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)04-0584-07

## 0 引言

卫星遥感热红外异常是指地球大气系统辐射的能量信息, 通过反演后得到的地面温度包含着地球内部的热信息(强祖基等, 1992)。通过对卫星热红外异常的时空分析, 不仅可以识别已有的地质构造, 而且还可能依据热红外异常的变化过程分析地质构造的活动状态, 发现地质灾害前兆。20世纪90年代开始, 国内外不少地震学者(马瑾等, 2000, 2006; 徐秀登等, 2000; 李茂玮, 杨忠东, 1996; 孔令昌, 强祖基, 1997; 单新建等, 2005a, b; 邓志辉等, 2003; 陈梅花等, 2003, 2007; 刘德富, 罗灼礼, 1997; 张元生等, 2002; 康春丽等, 2003; Ouzounov *et al.*, 2006; Tramutoli *et al.*, 2005; Arun, Swapnamita, 2005; 郭晓等, 2005; 方颖, 张艳梅, 2012; Freund, 2003; Gabrielov *et al.*, 2000) 分别对不同地区中强构造地震震前热红外地温、亮温、长波辐射等异常进

行了研究, 试图找出异常与地震“时、空、强”三要素之间的对应关系。

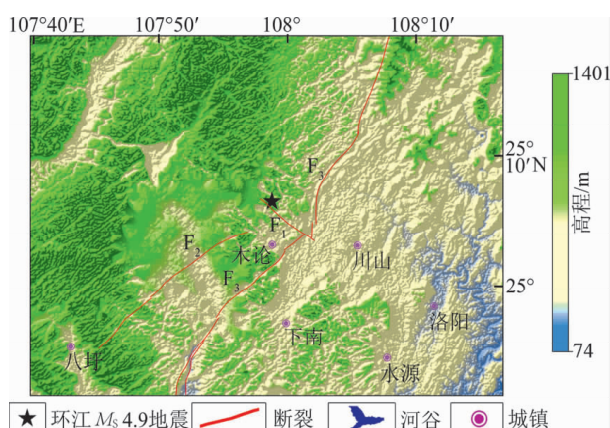
目前, 地震前红外异常与活动断裂的热活动状态研究已取得了大量有意义的成果, 但就现实存在的问题, 也有学者提出一些值得讨论的难点问题(马瑾等, 2005; 郭卫英等, 2004, 2006, 2008; 屈春燕等, 2006a, b)。一是地物红外辐射异常的成因复杂; 二是地形地貌、大气状况、岩石含水性和导电性、植被长势、风雨雪、纬度和季节变化等自然因素都会给我们正确判识震兆异常带来困难。因此, 客观认识各种非震因素的干扰, 提取真正与断层活动有关的热信息, 是利用卫星红外遥感技术进行地震预报的前提条件之一。本文在前人研究工作基础上, 以1998年4月16日广西环江  $M_s$  4.9 地震为例, 基于 NOAA/AVHRR 卫星遥感热红外数据, 反演得到震中附近地表温度场变化图像, 分析地震前、后地表温度异常时间演化过程及其异常空间分布与活动断裂关系, 并讨论了震中附近地形地貌、季节性气候等非构造因素对地温异常的影响。

\* 收稿日期: 2015-03-10.

基金项目: 广西科技攻关计划(1298005-2、1377002、12426001)资助.

## 1 研究区域概况

1998年4月16日广西环江(25.12°N, 107.98°E)发生 $M_s 4.9$ 地震,震源深度11 km。地震等烈度线长轴走向为北北西向,极震区包括广西环江县和贵州荔波县部分乡镇,烈度达Ⅵ度。1970年有仪器记录以来,距震中100 km范围内共记录到15次 $M_s \geq 2.5$ 地震,其中 $M_s \geq 3.0$ 地震5次,此次环江地震是这一地区迄今为止所发生的最大地震。震区一带分布有三组断裂,分别为北西向( $F_1$ )、北东向( $F_2$ )和北北东向( $F_3$ )断裂。其中 $F_3$ 断裂最为密集,长度最大; $F_2$ 断裂次之; $F_1$ 断裂数量最少,长度最短。现场考察认为 $F_1$ 是发震断裂,称为水源—木论断裂,长约20 km,地震发生在断裂西北端部,地震发震构造如图1所示。



$F_1$ : 水源—木论断裂;  $F_2$ : 北东向断裂;  $F_3$ : 北北东向断裂

图1 1998年环江 $M_s 4.9$ 地震发震构造图

Fig. 1 Seismogenic tectonic for the Huanjiang  $M_s 4.9$  earthquake in 1998

## 2 NOAA/AVHRR 数据与反演过程

美国国家海洋和大气局(NOAA)的极轨气象卫星系列已在太空运行30多年,与MODIS等卫星相比,NOAA/AVHRR地面分辨率较低(星下点像元面积为 $1.1 \text{ km}^2$ ),但它免费接收、地表覆盖范围大以及每日两次的高重复率等优点,已使这一卫星数据得到广泛应用。根据热红外辐射在大气

中传输的特点,NOAA/AVHRR第4和第5热通道(分别为10.5~11.3和11.5~12.5)最适合反演地表温度,并考虑到夜间时段太阳辐射造成的影响最小,最能反映地表温度场状况,故本文选用当地夜间时段NOAA/AVHRR第4和第5通道热红外数据,利用覃志豪等(2001)提出的劈窗算法(Split window algorithm)反演震中附近温度场变化图像。劈窗算法表达式为

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B. \quad (1)$$

式中, $T_s$ 为地面温度; $A$ 和 $B$ 为劈窗算法参数; $T_4$ 、 $T_5$ 分别为AVHRR第4、第5通道的亮度温度(覃志豪等,2001)。

卫星遥感观测到的热红外地表温度非常复杂,它在空间分布上受地形、地貌、介质的物理化学性质等影响,即使在正常气象条件和无地震活动情况下,红外地温背景也是不均一的(徐秀登等,2000)。在时间上它同时受气象和构造活动的影响,震前红外异常往往叠加了气象因素引起的地温变化,这为震前红外异常识别增加了难度。对红外增温机制目前也无统一的认识,研究区域越广,下垫面差异就越大,影响因子也越多。因此,将研究区域局限于活动断裂带附近,可以在一定程度上简化影响因子。本文以环江 $M_s 4.9$ 地震附近活动断裂区域(24°~26°N, 106°~109°E)为研究对象,选取1998年2月7日~7月7日NOAA/AVHRR数据进行地表温度反演,分析地震前后热红外异常时间演化过程,并将提取的异常图像与活动断裂叠加,探讨热红外异常空间分布与活动断裂关系,反演结果见图2。

从图2可以看出,从3月12日开始震中及周边区域异常热源面积逐步增大,扩展成片,异常区域颜色发黄(图2d);4月11日至发震当天的温度场反演图像显示震中附近地表温度达到峰值,异常升温主要分布于北东向( $F_2$ )、北北东向( $F_3$ )断裂与水源—木论断裂( $F_1$ )共轭交汇区域(图2g);地震发生后,震区附近地表温度逐步下降,震中深棕色增温区域减少,色彩偏淡,热源由震中向四周扩散(图2h)。4月27日之后,震区附近异常增温区域基本消失(图2i),具体异常描述见表1。

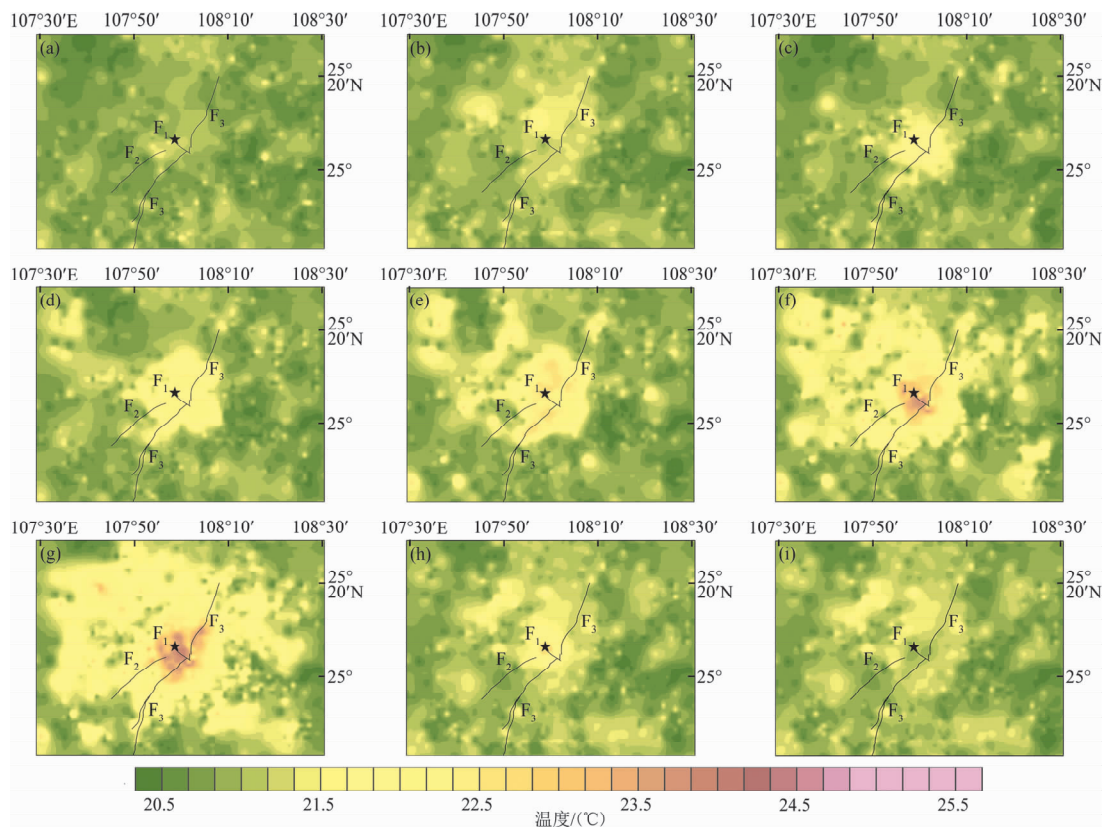


图2 环江  $M_s4.9$  地震前后热红外异常演化图像

(a) 2月7~17日; (b) 2月18~28日; (c) 3月1~11日; (d) 3月12~22日; (e) 3月23日~4月1日; (f) 4月2~10日; (g) 4月11~16日; (h) 4月17~26日; (i) 4月27日~5月7日

Fig. 2 The evolution patterns of thermal infrared anomaly before and after the Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake

表1 环江  $M_s4.9$  级地震前异常升温统计表

Tab. 1 Statistic of anomalous of land surface temperature increasing before Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake

序号	异常时间/月-日	升温区域	升温面积/ $\text{km}^2$	升温幅度/ $^{\circ}\text{C}$
1	03-01~03-11	$F_1$ 断裂、 $F_2$ 断裂北段、 $F_3$ 断裂中段	约 $0.16 \times 10^4$	1~2
2	03-12~03-22	$F_1$ 断裂、 $F_2$ 断裂北段、 $F_3$ 断裂中段	约 $0.67 \times 10^4$	1~2
3	03-23~04-01	$F_1$ 断裂、 $F_2$ 断裂中段、 $F_3$ 断裂	约 $0.21 \times 10^5$	1~3
4	04-02~04-10	$F_1$ 断裂、 $F_2$ 断裂、 $F_3$ 断裂	约 $0.37 \times 10^5$	2~3
5	04-11~04-16	$F_1$ 断裂、 $F_2$ 断裂、 $F_3$ 断裂	约 $0.42 \times 10^5$	3~4

### 3 讨论

#### 3.1 震区地温异常与地形地貌因子关系

地形因子是正确判识震兆异常的干扰因素之一,单新建和屈春燕(2004)认为高原、山脉等海拔较高地区地表温度整体背景偏低,盆地和低海拔地区地表温度整体背景偏高,它们之间有良好的对应关系;特别要注意沟谷和山脉,由于沟

谷地势较低,水系纵横,地表含水量高,即使正常情况地表温度也往往比附近山脉地区高出约5~10 $^{\circ}\text{C}$ 。但在一定的区域、时间段内,地温背景与地形是稳定的,通过跟踪时间演化过程及对比其他年份,可以有效地提取热红外异常信息。笔者利用震区附近数字高程栅格数据与热红外地表温度场叠加,研究活动断裂附近地形地貌与热异常动态关系。从地形温度场可以明显看出,与1997年3月16日~4月16日无震时段(图3a)相比,环



江  $M_s4.9$  地震前震区附近出现明显高温异常, 呈棕红色 (图 3b)。为了更直观认识此现象, 利用数字高程地形图在震中附近跨水源—木论断裂沿北北东向绘制 1 条长约 16 km 地形剖面 (剖面线位置见图 3c 中 A—A'), 读取剖面线 A—A' 同名像素点震前 (1998 年 3 月 16 日~4 月 16 日)、无震时期 (1997 年 3 月 16 日~4 月 16 日) 热红外地温均值, 绘制地温剖面图 (图 3d 中蓝色曲线为 1997 年 3 月 16 日~4 月 16 日无震时段同名像素点地温均值, 红色曲线为 1998 年 3 月 16 日~4 月 16 日环江

$M_s4.9$  地震前同名像素点地温均值), 与地形剖面图 (图 3d 中黑色曲线为高程值) 对比发现, 随着地形抬升, 与地形同名像素点红外地温随之降低, 二者表现出良好的负相关性; 同时从同名像素点无震时段地温均值曲线看出, 地温背景较为稳定, 而环江  $M_s4.9$  地震前地温均值高于无震时期 3~4 °C。与地形地貌因子相关分析表明, 震区附近地温总体呈现出随地形海拔上升而下降趋势, 并且此次环江地震附近断裂反映出较明显的震前构造“升温”信息。

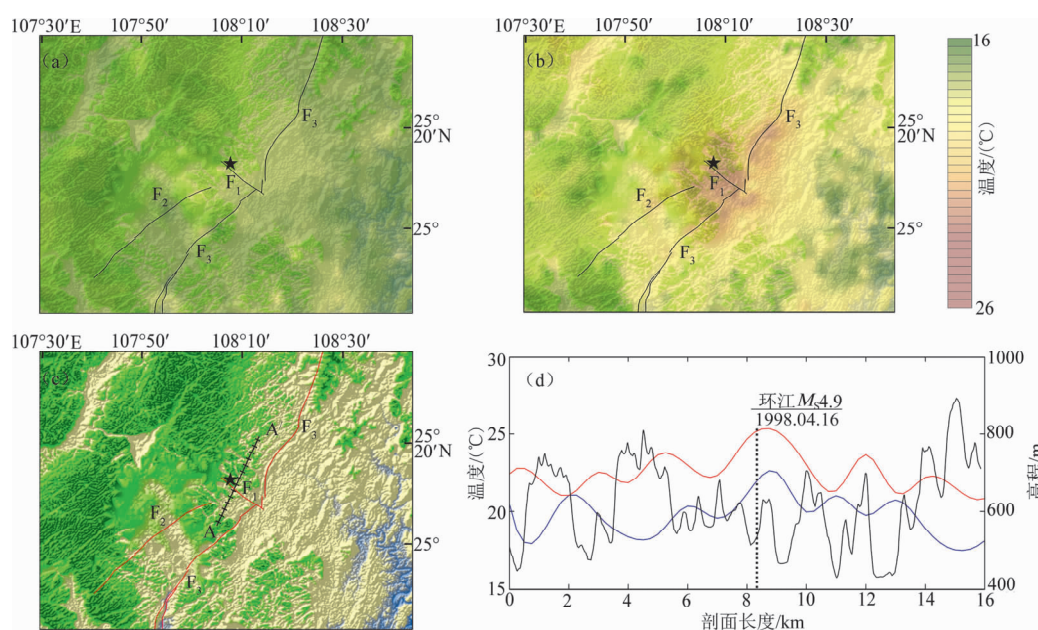


图3 震中附近地形温度场反演图像及其剖面地形高差与地温值关系图像

(a) 无震时段震中附近地形温度场反演图像; (b) 环江  $M_s4.9$  地震前震中附近地形温度场反演图像;

(c) 地形剖面图; (d) 跨水源—木论断裂 A—A' 剖面地形高差与地温值对比

Fig. 3 The inversion image of terrain temperature field near the epicenter region of Huanjiang earthquake and the relationship between the terrain elevation and land surface temperature for the A—A' profile

(a) the inversion image of terrain temperature field near the epicenter region in the period of without earthquake; (b) the inversion image of terrain temperature field before the Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake; (c) the terrain profile; (d) contrast of terrain elevation and the mean ground temperature for profile A—A' cross the Shuiyuan—Mulun Fault

### 3.2 震区地温异常与季节性气候因子关系

气候因子是正确判识震兆异常另一个干扰因素, 因此, 对震区正常气候年变形态的了解是判别热红外地温异常的必要前提。本文选取震中附近 (23°~27°N, 105°~109°E) 1990~2014 年每一年的 3 月 16 日~4 月 16 日实测平均地温进行纵向对比, 从图 4 可以看出, 在地震活动平静年份, 震区附近平均地温保持在 19~21 °C 之间, 与环江

低纬亚热带季风气候相符; 而在环江  $M_s4.9$  地震发生前, 震区附近平均地温明显增强, 增幅达到 3~4 °C, 表明震前在一定程度上反映出反季节变化的热红外“增温”现象。

### 3.3 异常增温为何由震中沿共轭断裂发育

章光月等 (1980) 和程万正 (1984) 认为构造活动不是某一条断裂的单独活动, 而是在一定范围内受区域应力场共同影响。因此, 除前兆异

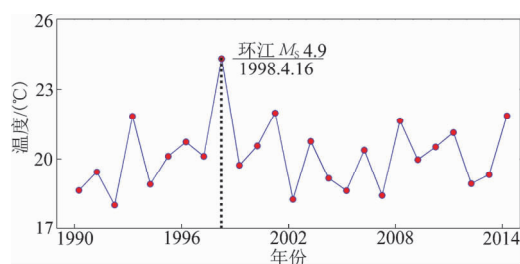


图4 1990~2014年震中附近地表温度变化曲线

Fig. 4 Curve of surface temperature in epicenter area from 1990 to 2014

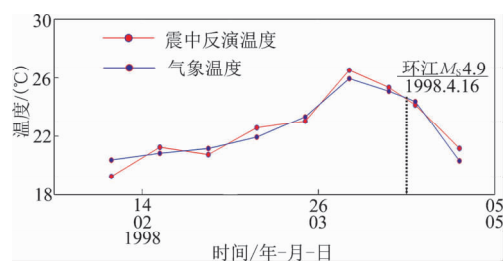


图5 震区温度随时间变化图像

Fig. 5 Curves of temperature change varied with time in epicenter area

常、前震以及余震受控于主震断层外,区域应力场也会影响其它断层活动。这些断层的分布可以平行于主震断层面,也可以与主震断层共轭发育,而地震前兆异常集中分布区域往往处于彼此共轭断裂的交汇带,这对于短临前兆异常场的影响更加显著。此次环江  $M_s 4.9$  地震发震断层为北西向水源—木论断裂 ( $F_1$ ),与北东向 ( $F_2$ )、北北东向断裂 ( $F_3$ ) 共轭交汇,其共轭交汇断裂往往处于应力状态变化复杂的敏感部位,异常多由交汇部位向几条相关断层上迁移(单新建,屈春燕,2004),这较好解释了此次环江地震前异常升温由震中附近沿  $F_1$ 、 $F_2$  与  $F_3$  断裂共轭发育现象。

### 3.4 异常升温条带是否为环江地震“前兆信息”

地震前兆异常,是相对于正常而言。从1998年2月7日~5月7日环江  $M_s 4.9$  地震前后整个异常演化过程可以看出:一是升温面积。随着发震时间临近,异常升温面积明显扩大;二是升温幅度。为了形象直观地进行分析,本文在每一景数据的震中附近采集温度数据,结合环江县气象资料绘制温度随时间变化曲线对比图,从图5中可以看出,热红外遥感反演的震中温度与环江县气象局实测温度基本相符,2月14日~3月20日升温幅度不显著,3月21日开始升温幅度逐步增大,在环江地震前半个月达到峰值;三是升温区域。北东向断裂 ( $F_2$ )、北北东向断裂 ( $F_3$ ) 与水源—木论断裂 ( $F_1$ ) 共轭交汇区域震前构造活动确有明显的热红外异常升温,异常沿NW与NE向交叉发育为主,与环江地震NW向发震构造较吻合。充分考虑地形地貌、季节性气候等非构造因素对异常升温的影响,认为此次环江  $M_s 4.9$  地震前热红外升温可能为震前短临异常现象。

## 4 结论

通过环江地震的例子说明,虽然地壳活动产生的地表温度异常隐藏于地形地貌、季节性气候、雨雪天气等非构造因素产生的复杂变化之中,但通过分析它们与红外异常的关系,去除非构造因素干扰,是有可能获得地壳活动某些信息的。应指出的是,利用地表温度获取地震前兆相关的热信息,一方面需要去除非构造因素的影响;另一方面,获得的热信息,还应与其他手段获得的成果(如潜热通量、亮温、长波辐射、气象资料)能够形成相互解释的逻辑链,关键是热场空间展布应与断层活动方式及其力学模式相符。后者相当于结果验证,只有经过检验才能提高可信度。

本研究得到了陈梅花副教授、徐甫坤工程师的悉心指导,广西环江县气象局提供了地表温度数据产品,在此一并致谢。

### 参考文献:

- 陈梅花,邓志辉,贾庆华. 2003. 地震前卫星红外异常与发震断裂的关系研究——以2001年昆仑山8.1级地震为例[J]. 地震地质, 25(1): 100-108.
- 陈梅花,邓志辉,马晓静,等. 2007. 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, 29(4): 863-872.
- 程万正. 1984. 前兆地震活动“窗口”或敏感部位的寻觅及有效性估计[J]. 地震研究, 7(6): 659-666.
- 单新建,李建华,马超. 2005a. 昆仑山口西  $M_s 8.1$  级地震地表破裂带高分辨率卫星影像特征研究[J]. 地球物理学报, 48(2): 321-326.
- 单新建,屈春燕,马瑾. 2005b. 卫星热红外观测与发震断层不同段落交替活动特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 25(2): 58-62.

- 单新建,屈春燕. 2004. 地震前热红外图像时空异常现象的机理分析 [A]. 遥感科技论坛暨中国遥感应用协会 2004 年年会, 279 - 285.
- 邓志辉,王煜,陈梅花,等. 2003. 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, 25(2): 327 - 337.
- 方颖,张艳梅. 2012. 日本 9.0 级大地震前长波辐射异常研究[J]. 地球物理学报, 55(8): 2620 - 2624.
- 郭卫英,单新建,马瑾. 2004. 对 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前断层带红外增温异常的讨论[J]. 地震地质, 26(3): 548 - 556.
- 郭卫英,单新建,屈春燕. 2006. 塔里木盆地红外增温现象与地震关系的探讨[J]. 干旱区地理, 29(5): 736 - 741.
- 郭卫英,马瑾,单新建. 2008. 活动断裂带的地形地貌差异与红外亮温年变特征的研究[J]. 地球物理学进展, 23(5): 1437 - 1443.
- 郭晓,张元生,钟美娇. 2005. 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, 27(3): 223 - 227.
- 康春丽,陈正位,陈立泽,等. 2003. 昆仑山口西 8.1 级地震的卫星热红外前兆特征分析[J]. 西北地震学报, 25(1): 12 - 15.
- 孔令昌,强祖基. 1997. 台湾海峡 7.3 级强震前的热红外增温异常[J]. 地震学刊, 17(3): 34 - 37.
- 李茂玮,杨忠东. 1996. 卫星遥感资料在地震预报中的应用研究一以 1991 年柯坪 6.5 级地震为例[J]. 内陆地震, 10(4): 296 - 303.
- 刘德富,罗灼礼. 1997. 强烈地震前的 OLR 异常现象[J]. 地震, (2): 12 - 20.
- 马瑾,陈顺云,刘培洵,等. 2006. 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[J]. 地球物理学报, 49(3): 816 - 823.
- 马瑾,单新建. 2000. 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, 22(3): 210 - 215.
- 马瑾,汪一鹏,陈顺云,等. 2005. 卫星热红外信息与断层活动关系讨论[J]. 自然科学进展, 15(12): 1467 - 1475.
- 强祖基,孔令昌,王弋平,等. 1992. 地球放气、热红外异常与地震活动[J]. 科学通报, 37(24): 2259 - 2262.
- 屈春燕,单新建,马瑾. 2006a. 红河断裂热红外高温条带的成因及其与地震活动性关系的探讨[J]. 地震学报, 28(1): 91 - 97.
- 屈春燕,单新建,马瑾. 2006b. 地震活动性热红外异常提取方法研究[J]. 地球科学进展, 21(7): 699 - 705.
- 覃志豪, ZHANG M. H., Arnon K. 2001. 用 NOAA - AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. 国土资源遥感, 48(2): 34 - 42.
- 徐秀登,徐向民,王煜. 2000. 台湾南投 7.6 级地震前卫星热红外异常[J]. 地震学报, 22(6): 666 - 669.
- 张元生,沈文荣,徐辉. 2002. 新青 8.1 级地震前卫星热红外异常[J]. 西北地震学报, 24(1): 1 - 4.
- 章光月,邓起东,蒋溥. 1980. 在地震孕育和发生过程中共轭断层活动的作用[J]. 地震地质, 2(1): 20 - 26.
- Arun K. S., Swapnamita C. 2005. Thermal remote sensing technique in the study of pre - earthquake thermal anomalies[J]. J. Ind. Geophys Union, 9(3): 197 - 207.
- Freund F. T. 2003. Rocks that crackle and sparkle and glow strange pre - earthquake phenomena[J]. Journal of Scientific Exploration, 17(1): 37 - 71.
- Gabrielov A., Zaliapin I., Newman W. L., et al. 2000. CoHiding cascades model for earthquake prediction[J]. Geophysical Journal International, 143(2): 427 - 437.
- Ouzounov D., Bryant N., Logan T., et al. 2006. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999 - 2003[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 31: 154 - 163.
- Tramutoli V., Cuomob V., Filizzola C., et al. 2005. 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, 96: 409 - 426.

## Analysis on Thermal Infrared Anomalous Before Huanjiang $M_s4.9$ Earthquake

WEN Xiang<sup>1</sup>, ZHOU Bin<sup>1,2</sup>, YAN Chun-heng<sup>1</sup>, BI Xi-rong<sup>1</sup>

(1. *Earthquake Bureau of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China*)

(2. *Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

### Abstract

Firstly, we collected the continuous thermal infrared data of NOAA/AVHRR satellite remote sensing in Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake zone from Feb. to May in 1998, and processed them through the clouds method. Secondly, we selected the thermal infrared data at local on the night time to inverse the land surface temperature. Finally, we analyzed time evolution process of land surface temperature anomalies before and after the Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake as well as the relationship between the abnormal spatial distribution and the active fault, and discussed the impact of non-structural factors such as the topography and landform, seasonal weather etc. in earthquake zone on land surface temperature anomalies. The result showed that: (1) There appeared a phenomenon of thermal infrared abnormal warming near the epicenter in two months before Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake, and the abnormal warming had a certain correspondence with the occurrence time of the earthquake. The significant warming happened in the first half of the month, and dropped rapidly after the earthquake. (2) Through the relative analysis of non-structural factors like the topography and landform, seasonal weather etc., we found that the structural “warming” information of anti-season changes was reflected by the earthquake. (3) The abnormal warming was cross-developed from the epicenter along the conjugate faults with the NW and NE directions, and it was relatively consistent with the seismogenic tectonic in NW of Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake. After full consideration of the influence of non-structural factors of the topography and landform, seasonal weather etc. on the abnormal warming, we inferred that this thermal infrared warming could be a short imminent anomaly phenomenon before the earthquake.

**Key words:** Huanjiang  $M_s4.9$  earthquake; land surface temperature; topography and landform; seasonal variation; precursory anomalies