

# 基于地震的断裂带内外温差分析法的改进 及其应用研究\*

吴 姍<sup>1</sup>, 郭 艳<sup>1♣</sup>, 曾佐勋<sup>2,3</sup>, 刘福江<sup>1</sup>, 林伟华<sup>1</sup>, 叶云霜<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)

地球科学学院华中构造力学研究中心, 湖北 武汉 430074; 3. 教育部三峡库区

地质灾害研究中心防灾减灾联合研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对依据热红外遥感数据的断裂带内外温差分析法存在的不足, 在确定断裂带内外区域时引入距断裂带两侧和两端的距离, 同时综合考虑地形、气候、地物类型等因素对温度的影响将其进行改进, 最后将该方法应用于2次地震进行验证。结果显示, 改进算法分析地震热异常的结果与前人研究的结论一致, 且该方法对断裂带内外区域的确定相对更加具体, 还可以很好地去除多种非震因素的影响。

**关键词:** 断裂带内外温差法; 热红外遥感; 地震; 热异常

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)01-0033-07

## 0 引言

20世纪80年代末, 前苏联学者在对亚洲中部地区的卫星红外遥感图像进行研究分析时, 发现该地区的一些中强震发生前卫星红外图像上出现了热异常现象, 便开始了利用热红外遥感探索地震前兆信息等研究, 如利用热红外遥感寻找地震前兆信息(强祖基等, 1990, 2010; 徐秀登等, 1991; Ouzounov, Freund, 2004), 探索断层的活动性研究(马瑾, 单新建, 2000; 马瑾等, 2005; 陈顺云等, 2014), 以及以地震前数年(无震年)的亮温温度均值作为背景场(Genzano *et al*, 2007), 提取地震热异常信息, 分析地震与热异常之间的关系研究。吴文渊(2011)利用热红外遥感和尺度分析插值法获取金衢盆地及四川盆地内和断裂相关的热信息(吴文渊, 2011); 李青梅等(2015)以红外遥感资料为依据, 用小波变化与功率谱相对变化法研究2014年云南景谷 $M_s 6.6$ 地震, 发现震前热异常具有明显的时空特征, 验证了使用卫星热红外数据提取异常信息的可行性。

在当前的研究中, 地震热红外异常信息提取

的算法根据原理不同, 可归纳为: 基于差值分析的异常提取算法(陈梅花等, 2003, 2007; Saraf, Choudhury, 2005; Panda *et al*, 2007)、基于背景场分析的异常提取算法(Genzano *et al*, 2007, 2009; Pergola *et al*, 2010; Tramutoli *et al*, 2013; 王一博, 2014; 宋冬梅等, 2016), 及基于信号分析的异常提取算法(Saradjian, Akhoondzadeh, 2011; 张璇等, 2013a, b; 郭晓等, 2014)。以上方法使地震热异常信息的提取变得更加精确, 但是地表温度是地壳深部构造活动、地形地貌、气象、季节、地物类型等多种非震因素共同作用的结果, 因此如何排除非构造因素的影响, 提取出准确的、微弱的地震热信息, 还需要进一步深化研究。

邓志辉等(2000)在对大量6级以上地震进行定量分析时, 发现活动断裂与地震活动具有密切的关系, 华北地区90%的7级以上地震和80%的6级以上地震会发生在距离活动断裂小于16 km的范围内。陈梅花等(2003)据此提出断裂带内外亮温差值分析方法, 该方法的原理是以给定半径, 围绕活动断裂带生成缓冲区并作为“断裂带内”区域, 再以“断裂带内”区域为对象向外扩展至一定的距离生成“断裂带外”区域, 但在

\* 收稿日期: 2018-05-03.

基金项目: 青藏高原东北隅新构造与现今活动性调查研究(12120114002201)资助.

♣ 通讯作者: 郭艳(1975-), 副教授, 主要从事智能计算和遥感信息处理. E-mail: 323110966@qq.com.

“断裂带内”和“断裂带外”区域的确定上较为粗略,且其缓冲半径为固定值,没有考虑震例本身情况,确定区域时只考虑距离断裂带两侧的距离,未考虑距离断裂带两端的距离。因此,本文针对以上不足,在区域的方法上进行了优化改进,根据具体地震本身升温范围,确定断裂带内外区域,并对改进后的方法进行了实验验证。

## 1 断裂带内、外温差改进算法

断裂带内外温差改进算法是在陈梅花(2003)所提出方法的基础上,主要在断裂带内、外区域的划分及地形因素对温度的影响上进行改进。

### 1.1 断裂带内、外区域确定

根据地质数据和地表温度(Land Surface Temperature, 简称 LST)数据,在震中位置做垂直于断裂带的横剖面,并获得横剖面上温度测点震前某天的温度数据,得到横剖面的温度-距离曲线,即可找出断裂带两侧的升温范围。

若震中位于该升温区域,过震中做平行于断裂带的纵剖面,并获取纵剖面上温度测点之间的温度-距离曲线,找出断裂带两端的升温区域,并以断裂带两侧和两端的升温区段长度,作为断裂带“上”“下”“左”“右”的缓冲半径,围绕横、纵剖面做缓冲区,相交区域即为“断裂带内”区域。再围绕“断裂带内”区域且以带内长度的一半作为缓冲半径生成“断裂带外”缓冲区域。

若震中位置不在该升温区域,过横剖面对比点的温度-距离曲线升温区域的中心点做平行于断裂带的纵剖面,获得纵剖面上温度测点之间的温度-距离曲线,同上述方法找出“断裂带内”及“断裂带外”区域。

### 1.2 地形因素影响去除

陈顺云等(2009)研究表明,温度与海拔存在定量关系,海拔每增加 100 m,温度降低  $(0.51 \pm 0.01)$  K。为剔除地形因素对温度的影响,利用获得的地形数据求得“断裂带内”区域和“断裂带外”的平均高程,根据高程差计算由于海拔差异产生的温度异常  $\Delta T$ :

$$\Delta T = \frac{(h_1 - h_2)}{100} \times 0.51 \quad (1)$$

式中:  $h_1$  为断裂带内的平均高程;  $h_2$  为断裂外的平均高程。

### 1.3 LST 数据统计

提取中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution imaging spectroradiometer, 简称 MODIS)数据的夜间 LST,且根据断裂带内外区域逐一批量裁剪,获取各天“断裂带内”和“断裂带外”区域地表温度数据,并将未被数据覆盖区域的值赋为 NaN,统计断裂带内外地表温度平均值并计算其温差,去除地形因素影响,得到断裂带内外温差数据及温差-时间曲线。温差计算公式为:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_2 + \Delta T \quad (2)$$

式中:  $T_1$  为断裂带内平均地表温度;  $T_2$  为断裂带外平均地表温度。

以此方法分析地震活动前后的热异常现象,可以很好地去除季节、气候、地物类型等非震因素的影响。根据剖面对比点温度-距离曲线可以推断热异常区域的分布,通过温差-时间曲线则可知热异常变化的时间和变化的幅度及跨度。实验过程如图 1 所示。

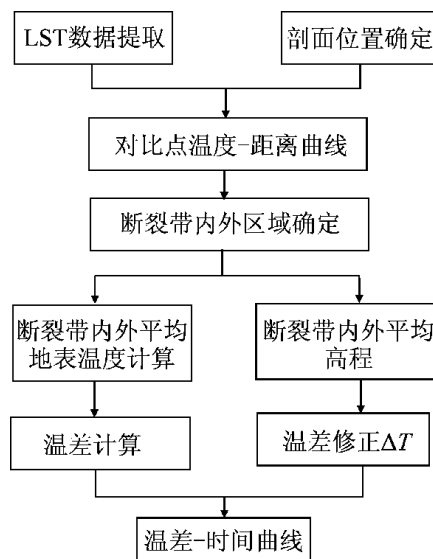


图 1 断裂带内、外温差改进算法实验流程图

Fig. 1 Experimental flow chart of the improved inside-outside temperature difference relation analysis method

## 2 实验验证

### 2.1 实验数据选取

本文所用实验数据有 MODIS 的 LST 产品、数字高程模型(Digital Elevation Model, 简称 DEM)

数据、地质数据。

MODIS 的 LST 产品属于晴空条件下获得的 Level 3 标准数据产品, 单位为 K, 精度为 1 K。为去除白天太阳辐射和地形阴影对地物温度带来的干扰, 本文选用夜间地表温度产品, 以反应地物的真实温度。由于部分夜间地表温度产品受云层影响导致数据不连续, 笔者依据周红妹等 (1995) 的研究成果进行云下像元恢复, 使用同周期相近时相的数据来反演替代云区。从 MOD11\_L2 及 MYD11\_L2 数据中提取出 LST 数据, 提取时依据刘福江和陈炫岩 (2017) 的数据处理方法完成投影方式的转换、校正、拼接及裁剪等, 且对数据裁剪及背景值处理等完成批量化处理。

DEM 数字高程数据采用 GDEM V2 30 m 分辨率数字高程数据。其中, 数据类型为 TIFF, 投影为经纬度, 覆盖范围为全球, 空间分辨率为 30 m, 数据量 251 GB, 值域范围为  $-152 \sim 8\,806$  m。地质数据主要是研究震例的地震信息及其所在断裂带分布数据等。

## 2.2 实验分析

### 2.2.1 2008 年西藏仲巴 $M_s 6.8$ 地震

2008 年 8 月 25 日 21 时 22 分, 西藏日喀则地区仲巴县 ( $83.6^\circ\text{E}$ ,  $31^\circ\text{N}$ ) 发生  $M_s 6.8$  地震, 震源深度 10 km。

选取 2008 年 7 月 22 日的 LST 数据, 处理得到西藏仲巴  $M_s 6.8$  地震的横纵剖面点的温度—距离曲线 (图 2a) 及升温范围。由于该地震的震中位置位于升温范围内, 过震中做平行于断裂带分布的纵剖面, 得到纵剖面温度—距离曲线及升温范围 (图 2b), 以横、纵剖面升温范围做“断裂带内”“断裂带外”以及剖面位置 (图 3)。

获取研究区域 2008 年 6 月 1 日至 9 月 15 日的 MOD11\_L2 及 MYD11\_L2 数据并做 Bow-tie 去除、LST 提取, 再用断裂带内、外区域逐一批量裁剪, 得到各天“断裂带内”和“断裂带外”平均地表温度数据, 以及 2008 年的温差—时间曲线结果 (图 4a)。

为验证只有在地震发生才出现温度异常现象, 用同样方法处理同区域 2007 年 6 月 1 日至 9 月 15 日及 2009 年 6 月 1 日至 9 月 15 日的 MOD11\_L2 及 MYD11\_L2 数据作为对比实验数据, 使用相同方法获得其温差—时间曲线 (图 4b, c)。

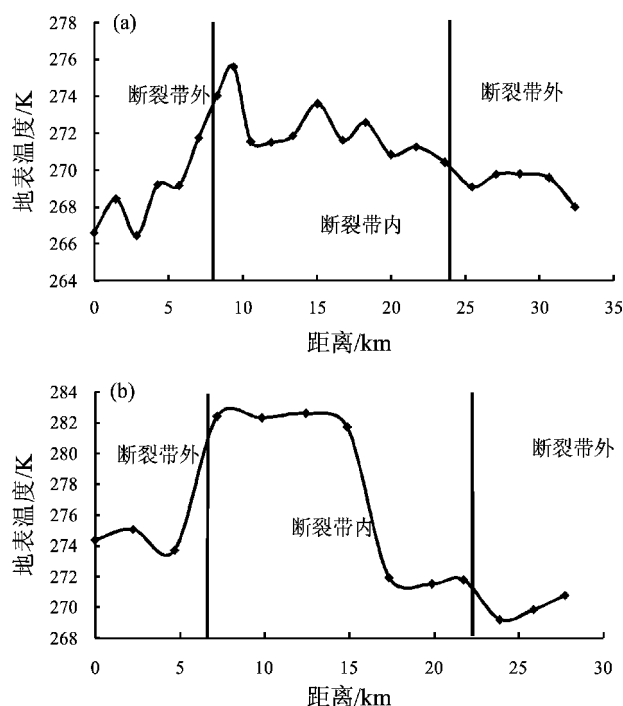


图 2 2008 年西藏仲巴地震横 (a)、纵剖面 (b) 温度—距离曲线

Fig. 2 Temperature-distance curve of transverse (a) and longitudinal sections (b) of Tibet Zhongba  $M_s 6.8$  earthquake in 2008

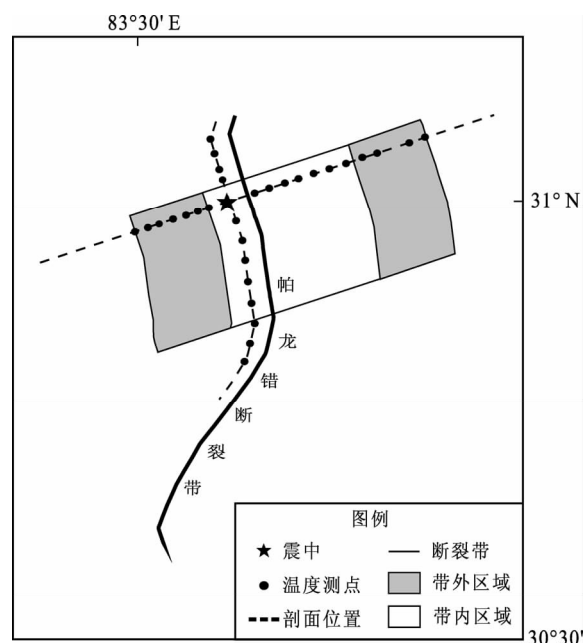


图 3 2008 年西藏仲巴地震断裂带内、外及剖面位置分布图

Fig. 3 Distribution map of inside and outside of the fault zone and the location of the profile of the Tibet Zhongba earthquake in 2008

图4a显示,地震发生前研究区域具有3次短期增温现象:①7月12—16日;②8月5—9日,8月13日出现一次明显降温,可能是因为云或其他气候因素的影响;③8月16日到震前又出现了增温现象,且在8月20日达到最高,震后温差逐渐回落至 $-1\text{ K}$ 左右。较之震前相对平稳的温差

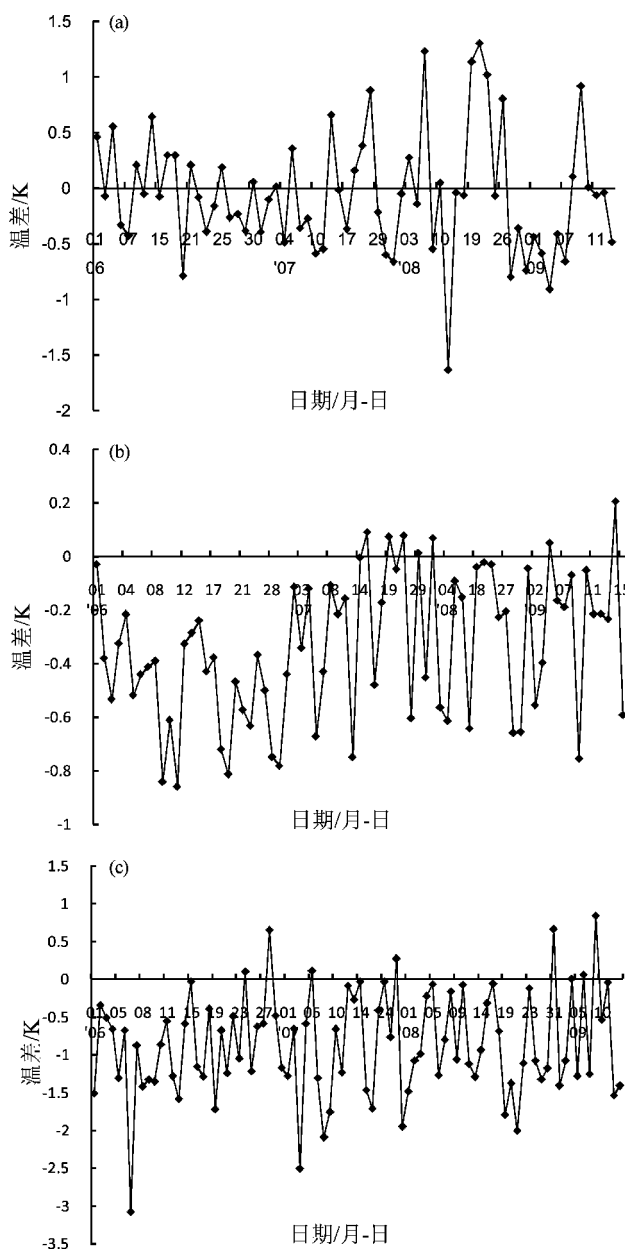


图4 2008年6月1日至9月15日(a), 2007年6月1日至9月15日(b)及2009年6月1日至9月15日(c)研究区温差-时间曲线  
Fig. 4 Temperature difference - time curve of the study area from Jun. 1 to Sep. 15, 2008 (a), from Jun. 1 to Sep. 15, 2007 (b) and from Jun. 1 to Sep. 15, 2009 (c)

幅度,热异常的增温幅度为 $0.5 \sim 1\text{ K}$ 。图4a表明,热异常现象基本符合断裂带内温度高于断裂带外的规律,增温区域发生在震中位置附近。非震年份(2007—2009年)的温差变化虽然不尽相同,但具有相对较平稳的趋势,2007年6月1日至9月15日研究区温差大多保持在 $-0.8 \sim 0.1\text{ K}$ (图4b),2009年6月1日至9月15日研究区域温差大多集中在 $-1.3 \sim 0.3\text{ K}$ ,未出现规律性以及持续性的热异常现象(图4c),认为2008年的热异常现象中包含了地震“热”信息。

## 2.2.2 2014年新疆于田 $M_s7.3$ 地震

2014年2月12日17时19分,新疆于田( $82.51^\circ\text{E}$ ,  $36.14^\circ\text{N}$ )发生 $M_s7.3$ 地震,震源深度 $12\text{ km}$ 。

同理获得新疆于田 $M_s7.3$ 地震的横纵剖面点的温度-距离曲线(图5)及升温范围。由于此次地震震中不在横剖面温度-距离曲线的升温范围内,过升温区域的中点做平行于断裂带的纵剖面,并得到纵剖面温度-距离曲线及升温范围(图5b),以横、纵剖面升温范围确定“断裂带内”“断裂带外”以及剖面位置(图6)。本文震中不在升温范围,是因为断裂带内外区域的确定选自

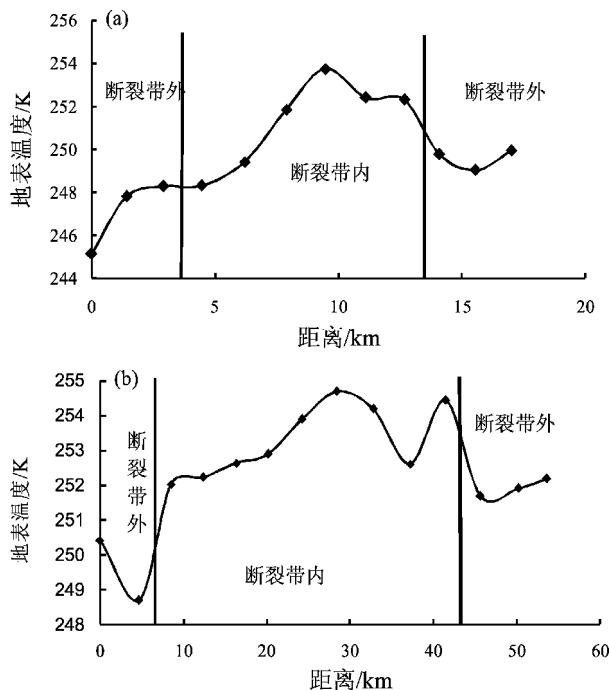


图5 2014年新疆于田地震横(a)、纵剖面(b)温度-距离曲线  
Fig. 5 Temperature - distance curve of transverse (a) and longitudinal sections (b) of Xinjiang Yutian earthquake in 2014

于2013年12月27日的LST数据,与地震发生时隔46 d,而地震具有迁移的性质(郭增建等,2014),极有可能在46 d内迁移至别处,2013年12月27日的升温异常现象,只是地震迁移过程中的前兆信息。

同理获取“断裂带内”和“断裂带外”平均地表温度数据,处理得到2013年12月14日至2014年2月28日的温差—时间曲线结果(图7a)。

为验证该方法,处理2012年12月2日至2013年2月26日及2014年12月1日至2015年2月28日的MOD11\_L2及MYD11\_L2数据作为实验对比数据,并分别获取了其温差—时间曲线(图7b, c)。

从图7a可以看出,地震发生之前研究区域有3次短期增温现象:①2013年12月27日至2014年1月3日出现小幅度的增温;②2014年1月22日至2月2日出现增温,并在1月27日增温达到最强,在2月3日出现回落;③2月8日又出现了增温现象,此后至震前开始回落,地震发生后温差逐渐恢复至平稳期的1 K左右,较震前相对平稳

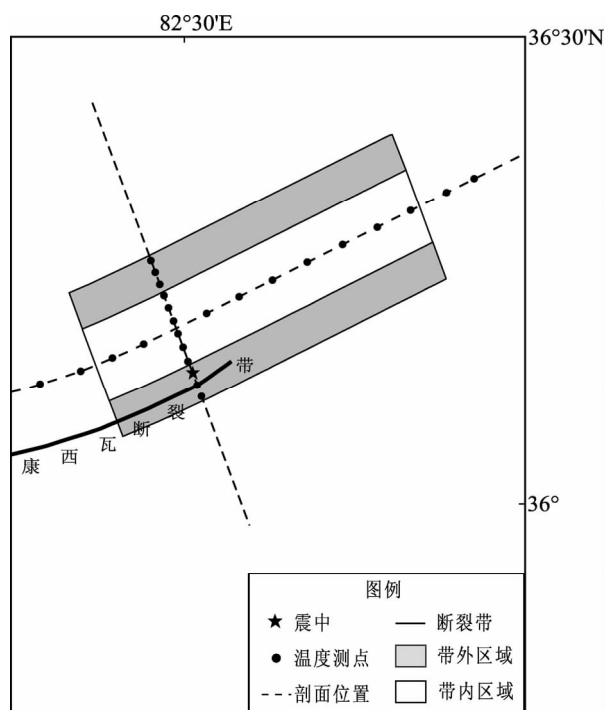


图6 2014年新疆于田地震断裂带内、外及剖面位置分布图

Fig. 6 Distribution map of inside and outside of the fault zone and the location of the profile of Xinjiang Yutian earthquake in 2014

的温差幅度,热异常的幅度为0.5~1.6 K。通过横、纵剖面的温度—距离曲线可知,热异常现象基本符合断裂带内温度高于断裂带外温度的规律,增温区域同样发生在震中位置附近。作为对比的非震年份,温差变化幅度基本保持在相对稳

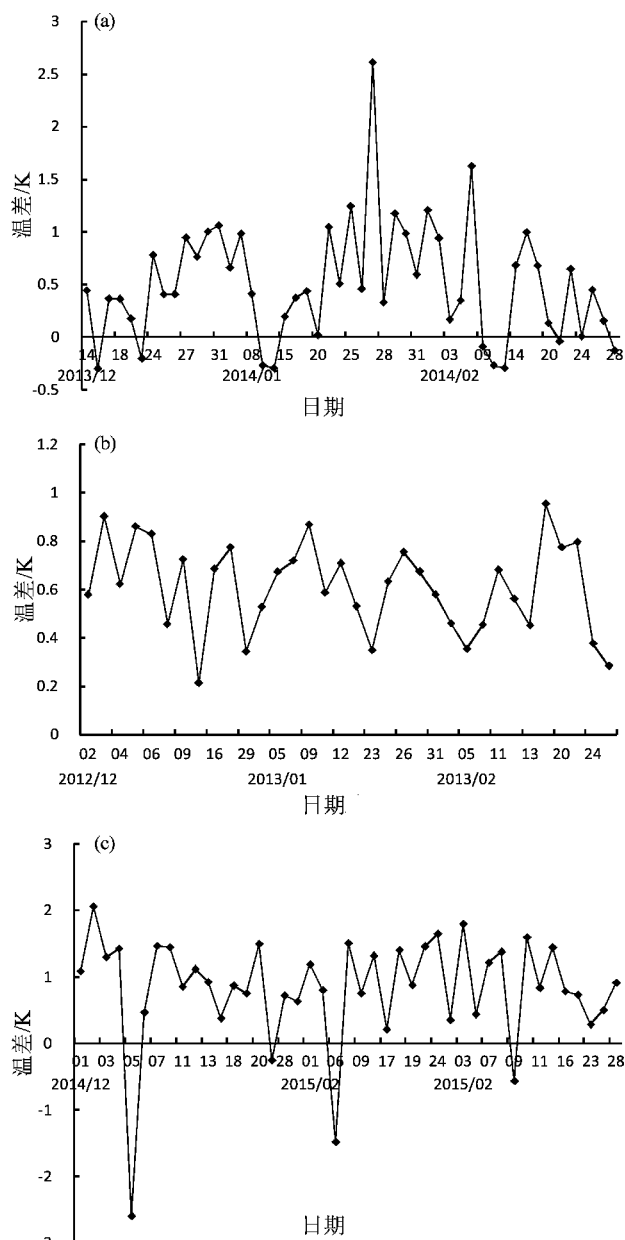


图7 2012年12月14日至2014年2月28日(a), 2012年12月2日至2013年2月26日(b)及2014年12月1日至2015年2月28日(c)研究区温差—时间曲线

Fig. 7 Temperature-time curves of the study area from Dec. 14, 2012 to Feb. 28, 2014 (a), from Dec. 2, 2012 to Feb. 26, 2013 (b) and from Dec. 1, 2014 to Feb. 28, 2015 (c)

定的状态下,其中图 7b 中温差变化在 0.3 ~ 0.8 K,图 7c 中的温差变化大多数集中在 0.4 ~ 1.5 K,只有极少数的异常数据,均未出现明显的热异常变化现象。

### 2.3 实验结果分析

将本文方法应用于 2008 年四川汶川  $M_s 8.0$ 、2013 年甘肃岷县彰县  $M_s 6.7$  地震,由于篇幅有限不再赘述。所有 4 个震例都表现出共同的特征:

(1) 地震前几天至几十天会出现热异常现象,持续时间和出现异常的次数不等,呈现突发性特征,异常现象一般表现为增温—回落—平稳,具有阶段性。

(2) 温差增温幅度与地震震级之间具有一定的正相关性,震级越大,温差增温幅度越大。震中位于热异常区域或区域附近位置。

(3) 非震年份温差变化比较稳定,虽然在不同年份变化幅度不同,但除去个别异常点之外,大体保持一个稳定变化的状态下。

上述分析结果与地震的热异常理论保持一致,符合地震热异常现象,验证了本文断裂带内外温差改进算法的准确性。

## 3 结论与讨论

本文方法在前人提出的断裂带内、外温差分析方法上做了改进,体现在断裂带内、外区域的确定技术上,引入断裂带两侧及两端的距离,根据具体震例的升温范围做缓冲区生成断裂带内、外区域,而不是以固定值 16 km 生成缓冲区,在做温度分析时,去除了地形对温度造成的影响。通过实验分析,其结果与地震的热异常理论保持一致,符合地震热异常现象,验证了本文改进方法的准确性。

使用本文方法可以较好地去除地形地貌、气象变化、地物类型、大气等因素的影响,但该方法具有一定的缺陷:①在数据的选择上,由于 MODIS 数据受云层等影响,导致数据选取出现不连续现象;②不能直观地表现出升温区域的迁移过程,需与其他方法结合使用;③本文断裂带内外温差改进算法具有一定的经验性。

针对上述不足之处,在下一步研究中,将使用其他卫星数据或野外地温观测数据进行替换或者基于劈窗算法进行地表温度反演;研究其他方

法,并结合本文方法一起使用;进一步探讨地震热异常的变化幅度是否与震源深度、发震位置等因素相关,以及相邻其他断裂是否对发震断裂具有热异常的影响,影响的程度及剔除方法。

刘江福副教授在实验及成文过程中进行了悉心指导,曾佐勋老师提供了指导意见,金石团队在实验过程中给予帮助,在此一并表示感谢。

### 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.
- 陈顺云,马瑾,刘培洵,等. 2009. 中国大陆地表温度年变基准场研究[J]. 地球物理学报, 52(9):2273-2281.
- 陈顺云,马瑾,刘培洵,等. 2014. 利用卫星遥感热场信息探索现今构造活动:以汶川地震为例[J]. 地震地质, 36(3):775-793.
- 邓志辉,全明纯,楚全芝,等. 2000. 活动断裂与强震分布的空间定量关系研究[C]//面向 21 世纪地震科学技术—青年科学论坛. 北京:地震出版社,195-201.
- 郭晓,张元生,魏从信,等. 2014. 汶川 8.0 级和仲巴 6.8 级地震中波红外热辐射异常[J]. 地球学报, 35(3):338-344.
- 郭增建,郭安宁,张惠芳,等. 2014. 地震迁移始发区的前兆在地震预测中的意义[J]. 灾害学, 29(3):15-17.
- 李青梅,张元生,吕俊强,等. 2015. 2014 年 10 月 7 日云南景谷  $M_s 6.6$  地震热红外异常[J]. 地震工程学报, 37(4):1007-1012.
- 刘福江,陈炫岩. 2017. 基于高分影像限定化 NDVI 的园林城市遥感解译关键技术研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 36(3):106-110.
- 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,徐秀登,侯常恭,等. 1990. 卫星热红外异常:临震前兆[J]. 科学通报, 35(17):1324-1327.
- 强祖基,马嵩乃,曾佐勋,等. 2010. 卫星热红外地震短临预测方法研究[J]. 地学前缘, 17(5):254-262.
- 宋冬梅,臧琳,单新建,等. 2016. 基于 LST 年趋势背景场的地震热异常提取算法[J]. 地震地质, 38(3):680-695.
- 王一博. 2014. MODIS 地震热异常的数据处理与算法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东).
- 吴文渊. 2011. 从热红外遥感获取断裂相关信息的方法研究[D]. 杭州:浙江大学.
- 徐秀登,强祖基,侯常恭,等. 1991. 临震卫星热红外异常与地面增温异常[J]. 科学通报, 36(4):291-294.
- 张璇,张元生,魏从信,等. 2013a. 云南彝良 5.7 级地震前卫星热红

- 外异常[J]. 地震工程学报, 35(1): 171–176.
- 张璇, 张元生, 魏从信, 等. 2013b. 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, 35(2): 272–277.
- 周红妹, 杨星卫, 陆贤. 1995. NOAA 气象卫星云检测方法的研究[J]. 环境遥感, (2): 137–142.
- Genzano N, Aliano C, Filizzola C, *et al.* 2007. A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: the case of Buhl – Gujarat earthquake[J]. *Tectonophysics*, 431(1): 197–210.
- Genzano N, Aliano C, Corrado R, *et al.* 2009. RST analysis of MSG – SEVIRI TIR radiances at the time of the Abruzzo 6 April 2009 earthquake[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6): 2073–2084.
- Ouzounov D, Freund F. 2004. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data[J]. *Advances in Space Research*, 33(3): 268–273.
- Saradjian M R, Akhondzadeh M. 2011. Thermal anomalies detection before strong earthquakes ( $M > 6.0$ ) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(4): 1099–1108.
- Saraf A K, Choudhury S. 2005. Cover: NOAA-AVHRR detects thermal anomaly associated with the 26 January 2001 Buhl earthquake, Gujarat, India[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 26(6): 1065–1073.
- Panda S K, Choudhury S, Saraf A K, *et al.* 2007. MODIS land surface temperature data detects thermal anomaly preceding 8 October 2005 Kashmir earthquake[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 28(20): 4587–4596.
- Pergola N, Aliano C, Coviello I, *et al.* 2010. Using RST approach and EOS – MODIS radiances for monitoring seismically active regions: a study on the 6 April 2009 Abruzzo earthquake[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2): 239–249.
- Tramutoli V, Aliano C, Corrado R, *et al.* 2013. On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake – prone areas observed using robust satellite techniques (RST) [J]. *Chemical Geology*, 339: 157–168.

## Research on Improved of Temperature Difference Inside – outside Fault Zone Analysis Method Based on Earthquake and Its Application

WU Shan<sup>1</sup>, GUO Yan<sup>1</sup>, ZENG Zuoxun<sup>2,3</sup>, LIU Fujiang<sup>1</sup>, LIN Weihua<sup>1</sup>, YE Yunshuang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

(2. Huazhong Tectonomechanical Research Center, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

(3. Joint Research Center for Disaster Prevention and Reduction, Three Gorges Research Center for Geohazards, Ministry of Education, Wuhan 430074, Hubei, China)

### Abstract

Aiming at the shortcomings of temperature difference inside – outside fault zone analysis method for thermal infrared remote sensing data, we improved this method for two aspects. Firstly, when determining the area inside and outside the fault zone, we introduced the distance between the two measuring points and the two ends of the fault zone. Secondly, the influence of terrain, climate and type of ground objects on temperature is taken into account. Finally, the method is applied to two earthquakes for verification. The results show that the results of the improved algorithm are consistent with those of previous studies, and the method is more specific in determining the area inside and outside the fault zone, and it can also remove the influence of many non – seismic factors.

**Keywords:** inside – outside temperature difference relation analysis method; thermal infrared remote sensing; earthquake; thermal anomaly