

张铁宝、路茜、辛华等, 2015, 汶川和芦山地震前后巴颜喀拉地块中东段红外亮温分析, 中国地震, 31(2), 344 ~ 352。

汶川和芦山地震前后巴颜喀拉地块 中东段红外亮温分析

张铁宝 路茜 辛华 刘放

四川省地震局, 成都市人民南路 3 段 29 号 610041

摘要 基于 MODIS 卫星遥感红外数据, 用小波方法提取并分析了汶川和芦山地震前后巴颜喀拉地块中东段红外亮温低频信息。结果显示, ①在汶川 8 级地震前, 巴颜喀拉地块中东段红外亮温升温异常多次出现 (5 次), 震后近 5 年无升温异常出现, 在芦山 7 级地震前 2 个月再次出现升温异常; ②汶川地震前升温异常的高值区在空间上有逐渐往龙门山断裂带方向迁移的特点; ③在全部 6 次升温异常中, 只有 2008 年 4 ~ 6 月和 2013 年 2 月 ~ 4 月 19 日 2 次临近地震的异常, 巴颜喀拉地块中东段内部亮温出现大幅度均衡升温, 这可能是该地区强震的临震信号。

关键词: MODIS 遥感红外 巴颜喀拉地块 汶川地震 芦山地震

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0344-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

卫星遥感红外资料研究表明, 7 级以上强震前相关地区存在不同程度的热辐射异常现象 (徐秀登等, 1990; 强祖基等, 1992、1998; 刘德富等, 1997、2005; 陈梅花等, 2003; 康春丽等, 2003、2009; 张元生等, 2002、2011; 荆风等, 2012、2013; 魏从信等, 2013; 张璇等, 2013; 郭晓等, 2014)。2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 $M8.0$ 特大地震, 形成了近 300km 的破裂带 (张培震等, 2008), 5 年后的 2013 年 4 月 20 日四川芦山发生 $M7.0$ 强烈地震, 汶川 $M8.0$ 地震和芦山 $M7.0$ 地震均为发生在龙门山断裂带上的高角度逆冲型地震 (王卫民等, 2008; 刁桂苓等, 2010; 刘杰等, 2013; 曾祥方等, 2013), 同一组断裂带上在较短时间内连续发生 2 次 7 级以上强震, 这为分析强震前卫星遥感红外异常提供了难得的震例。实验与理论研究证明, 热场在时空上与应力、应变场关系密切, 岩石在弹性变形阶段, 温度变化与体积变化有关, 体积收缩升温, 体积膨胀降温 (马瑾等, 2010; 陈顺云等, 2012), 长期受压变形且与汶川、芦山地震孕育存在密切联系的巴颜喀拉地块中东段, 在汶川和芦山两次强震前后卫星遥感红外亮温的时空演化过程值得认真研究, 或许能从卫星遥感红外场的演化过程中找到一些与汶川和芦山地震有关的信息。本文用小波分析方法, 对巴颜喀拉地块中东段 (图 1 阴影部分) 的 MODIS (中分辨率成像光谱仪) / Terra 卫星遥感红外亮温低频信息进行了分析。

[收稿日期] 2014-01-06; [修定日期] 2014-06-27

[项目类别] 四川省地震局地震科技专项 (LY1311) 资助

[作者简介] 张铁宝, 男, 1981 年生, 工程师, 主要从事卫星红外遥感地震预测应用研究。

E-mail: tiebaozhang@163.com

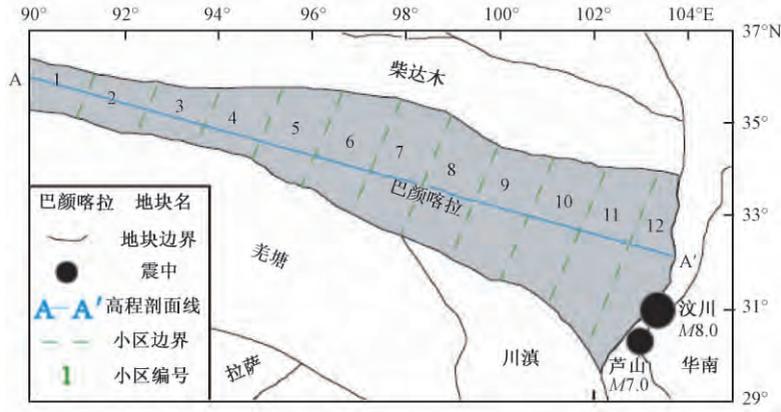


图1 研究区示意图(地块边界引自张培震等(2003)的结果)

1 遥感资料

Terra 卫星 1999 年 12 月 18 日发射升空,为极轨卫星,MODIS 是卫星搭载的一种对地观测仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 $0.4 \sim 14 \mu\text{m}$ 的离散电磁波谱范围内,在 36 个通道中,有 6 个通道探测的信息与地表温度有关(刘玉洁等,2001),即 20 ($3.660 \sim 3.840 \mu\text{m}$)、21 ($3.929 \sim 3.989 \mu\text{m}$)、22 ($3.929 \sim 3.989 \mu\text{m}$)、23 ($4.020 \sim 4.080 \mu\text{m}$)、31 ($10.780 \sim 11.280 \mu\text{m}$) 和 32 ($11.770 \sim 12.270 \mu\text{m}$) 通道。陈顺云等(2011)通过遥感与实测地表温度对比研究表明,选用白天和夜间数据分析几十天以上的变化,其结果没有实质性区别,对分析低频趋势变化,白天数据便能满足需求,因此,本研究选用白天过境经过定标定位后的 21 通道 ($3.929 \sim 3.989 \mu\text{m}$) MODIS/Terra 红外亮温数据。MODIS 1B 数据格式为 EOS-HDF 格式,利用普朗克公式计算 21 通道的 MODIS 1B 数据可得到 21 通道红外亮温数据,红外亮温数据空间分辨率为 1 km ,分析数据的时间范围为 2004 年 3 月 17 日~2013 年 4 月 19 日,共 9 年多,5000 多景。有云时候卫星红外遥感探测的是云顶信息而非地表信息,本文中数据经过去云处理。

2 处理方法

2.1 小波变换

小波变换作为一种时频分析方法,近十几年来被广泛应用于各个领域。短时傅里叶分析使用固定的窗函数,只能在一个分辨率上进行,而小波变换则克服了短时傅里叶变换在单分辨率上的缺陷,具有多分辨率分析的特点,可以对各周期分量进行时间定位。小波变换通过改变时间-频率窗口形状可很好解决时间分辨率和频率分辨率的矛盾,在时间和频率域都有明显的局部化性质,在弹性的时-频窗内,不同频率的信号在时间域可自动调节取样的疏密。对低频信号,采用宽的时间窗(低的时间分辨率),得到高的频率分辨率;对高频信号,则采用窄的时间窗(高的时间分辨率),得到低的频率分辨率,从而使小波分析享有“数学显微镜”的美誉(彭玉华,1999;李琪等,2006;李登峰等,2010;解滔等,2013)。

函数 $f(t)$ 以小波 $\psi(t)$ 为基的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

式中 $\psi_{a,b}(t)$ 为小波基函数, 通过基本小波 $\psi(t)$ 伸缩和平移生成, 其中, a 和 b 同为实数, a 是基函数的尺度伸缩因子, b 是时间平移参数。

2.2 小波变换的应用

笔者在分析大空间尺度的亮温变化时, 不对单个象元逐一提取分析, 而对分析区内所有象元的均值进行分析。文中利用 Daubechies 小波提取巴颜喀拉地块中东段(图 1 阴影区)亮温均值的低频信息。Daubechies 小波系通常记为 dbn , n 是小波的序号, 取值为 $1, 2, 3 \dots, 10$ 等, 该小波系除了 $db1$ (即 Haar 小波) 外, 其它小波没有明确的解析表达式, Daubechies 小波具有正交性、紧支撑性以及不对称性, 且光滑性与 n 成正比(李登峰等, 2010)。文中利用 MATLAB 小波工具箱函数, 用 $db4$ 小波对巴颜喀拉地块中东段的亮温均值数据进行处理, 当分解到 5 阶时, 尺度部分(低频)保留了 2 个月以上周期的信息, 文中数据处理的目的是去除以日为尺度的高频信息, 提取月以上周期的低频信息, 分解到 5 阶已能满足需求。

3 巴颜喀拉地块中东段亮温分析

3.1 巴颜喀拉地块中东段亮温分析

图 2 为巴颜喀拉地块中东段亮温均值低频信息异常提取结果。地块亮温均值曲线(图 2(a))具有夏高冬低的季节特征, 存在很多高频成分, 从中不易发现异常变化。图 2(c) 为小波分解得到的地块亮温均值低频信息及其背景场曲线, 背景场通过计算低频信息同期均值得到。实验证实岩石温度变化与体积变化有关, 压缩升温(马瑾等, 2010; 陈顺云等, 2012), 巴颜喀拉地块中东段应变背景为受压, 因此, 文中重点分析升温异常。图 2(d) 为低频信息与背景场的差值(下文中简称为差值), 差值数据的 1.5 倍、2 倍和 3 倍标准差线在图中对应的数值分别为 2.55K、3.41K 和 5.12K, 升温异常判别采用地震前兆手段常用的方法, 即以差值曲线的 1.5 倍标准差线为正常背景的高值上限, 差值超过高值上限判断为异常。从图 2(c) 和 (d) 中可看出, 曲线中共出现了 6 次升温异常(图 2(c)、(d) 红色箭头, 表 1)。

依升温异常次数可将整个时段分成 4 个阶段, 第 1 阶段为 2004 年 3 月~2006 年 6 月(时长 2 年 4 个月), 无升温异常; 第 2 阶段为 2006 年 7 月~2008 年 6 月(时长 2 年), 有 5 次升温异常; 第 3 阶段为 2008 年 7 月~2013 年 1 月(时长 4 年 7 个月), 无升温异常; 第 4 阶段为 2013 年 2 月~4 月 19 日, 出现 1 次升温异常。在第 2 阶段中, 升温异常频次高, 幅度大, 5 次升温异常中, 有 3 次超过 2 倍标准差线, 1 次超过 3 倍标准差线; 在第 4 阶段中, 升温异常频次不高, 但幅度较大, 超过 2 倍标准差线。在汶川 8 级地震前升温异常多次出现, 震后持续 4 年 7 个月无升温异常, 2013 年 2 月再次出现升温异常, 其后发生芦山 7 级地震。

表 1 升温异常统计表

序号	时段	幅度
1	2006-07 ~ 2006-08	超过 1.5 倍标准差线
2	2007-03 ~ 2007-05	超过 3.0 倍标准差线
3	2007-09 ~ 2007-10	超过 2.0 倍标准差线
4	2007-12 ~ 2008-01	超过 1.5 倍标准差线
5	2008-04 ~ 2008-06	超过 2.0 倍标准差线
6	2013-02 ~ 2013-04-19	超过 2.0 倍标准差线

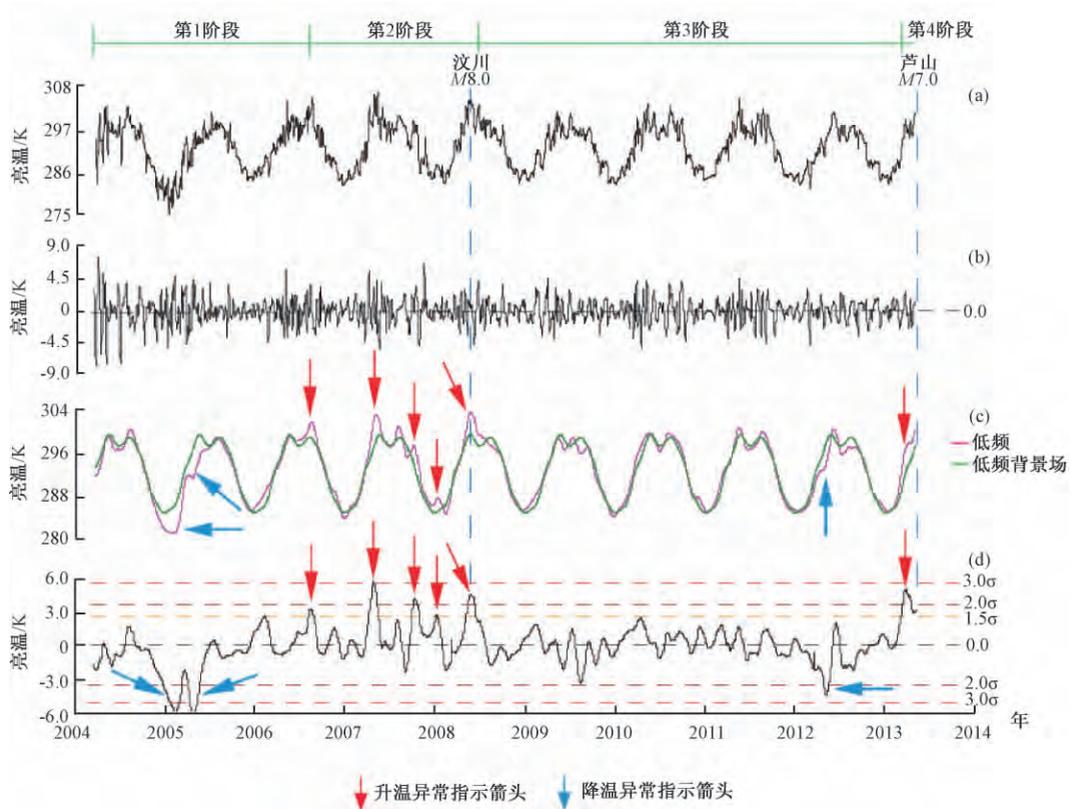


图2 巴颜喀拉地块中东段亮温均值小波分解结果

(a) 亮温均值曲线; (b) 亮温均值与5阶小波低频部分差值曲线; (c) 5阶小波低频部分与背景场曲线;
(d) 5阶小波低频部分与背景场差值曲线

从图2(c)和(d)中可看出,在整个时段有3次超过2倍标准差线的显著降温异常(图2蓝色箭头),3次降温异常时段分别为2004年12月下旬~2005年3月初、2005年4月初~2005年5月中旬和2012年4月中旬~2012年4月底。2004年12月~2013年4月间,印尼苏门答腊地区共发生4次8.5级以上地震(表2),其中3次地震的发生时间与巴颜喀拉地块中东段3次降温异常的时段存在很好的对应关系,初步分析认为巴颜喀拉地块中东段出现的这3次显著降温异常与苏门答腊地区的3次8.5级以上地震有关。另外,2007年9月12日印尼8.5级地震的发生时间与图2中2007年9月~2007年10月升温异常的时段相对应,巴颜喀拉地块中东段产生的大幅度红外升温与印尼苏门答腊大地震对青藏高原的降温作用叠加可能是图2中2007年9月后没出现显著降温异常的重要原因。

表2 印尼苏门答腊地区 $M \geq 8.5$ 地震统计表(统计时段2004年12月~2013年4月)

年-月-日	纬度	经度	震级	地点
2004-12-26	3.9°N	095.9°E	8.7	苏门答腊岛西北
2005-03-29	2.2°N	097.0°E	8.5	苏门答腊北部
2007-09-12	4.4°S	101.5°E	8.5	苏门答腊南部海中
2012-04-11	2.3°N	093.1°E	8.6	苏门答腊北部附近海域

3.2 地块内部亮温分析

上节分析表明,整个巴颜喀拉地块中东段在汶川和芦山地震前存在多次大幅度亮温升温异常,为进一步分析其内部的亮温变化,本节将整个巴颜喀拉地块中东段(下文中简称为大区)从西往东分成 12 个与巴颜喀拉地块东边界大致平行的小区(下文中简称为小区,小区划分见图 1 绿色虚线),并按大区相同的处理方法计算出 12 个小区亮温低频信息的差值(图 3)。为便于分析 12 个小区异常情况,从图 3 中提取了与图 2 中 6 次升温异常时段相对应的各小区最大差值(升温幅度),得到 6 幅地块内部升温幅度分布图(图 4)。图 5 为巴颜喀拉地块中东段从西往东(图 1 AA')的高程图,自西往东巴颜喀拉地块中东段高程逐渐降低,图 4 中块体内部升温幅度的分布与高程的相关度不高,这说明扣除背景场的处理在很大程度上扣除了高程对亮温的影响。

图 4(a)给出了 2006 年 7~8 月块体内部升温的幅度,1~7 区的升温幅度超过 1.5 倍标准差线,最大升温区是第 4、5 和 6 小区。最大值与最小值差为 4.4K。

图 4(b)给出了 2007 年 3~5 月块体内部升温的幅度,12 个小区的升温幅度均超过 1.5 倍标准差线,最大升温幅度区是 6 和 7 小区。最大值与最小值差为 5.2K。

图 4(c)给出了 2007 年 9~10 月块体内部升温的幅度,5~12 小区的升温幅度超过 1.5 倍标准差线,最大升温幅度区是 8 和 9 区。最大值与最小值差为 5.8K。

图 4(d)给出了 2007 年 12~1 月块体内部升温的幅度,10~12 小区的升温幅度超过 1.5 倍标准差线,最大升温幅度区是 10 和 11 区。最大值与最小值差为 2.9K。

图 4(e)给出了 2008 年 4~6 月块体内部升温的幅度,12 个小区的升温幅度均超过 1.5 倍标准差线,最大升温幅度区是 5、6 和 7 区。最大值与最小值差为 3.5K。从图 3 可得到 2008 年 4~6 月 12 个小区升温幅度达到 1.5 倍标准差线的日期,从西往东,分别为 2008 年 5 月 10 日、5 月 6 日、5 月 5 日、5 月 4 日、5 月 2 日、4 月 30 日、4 月 23 日、5 月 3 日、5 月 2 日、5 月 5 日、4 月 5 日和 4 月 6 日,异常出现时间分成了 2 个时段,靠近龙门山断裂带的 11 和 12 区在汶川地震前 1 个月左右即 4 月初就出现了异常,其它 10 个小区在稍晚的 4 月底 5 月初才开始出现升温异常。

图 4(f)给出了 2013 年 2 月~4 月 19 日块体内部升温的幅度,12 个小区的升温幅度均超过 1.5 倍标准差线,最大升温区位于靠近龙门山断裂带的 9、10 和 11 区。最大值与最小值差为 3.1K。据图 3 还可以得到 2013 年 2 月~4 月 19 日 12 个小区升温幅度达到 1.5 倍标准差线的日期,从西往东,分别为 2013 年 2 月 23 日、2 月 26 日、2 月 25 日、2 月 22 日、2 月 20 日、2 月 22 日、2 月 22 日、2 月 24 日、2 月 14 日、2 月 15 日、2 月 13 日和 2 月 15 日,异常出现时间分成了 2 个时段,靠近龙门山断裂带的 9、10、11 和 12 区在芦山地震前 2 个月左右即 2 月中旬就出现了异常,其它 8 个小区集中在稍晚的 2 月下旬才开始出现升温异常。

4 结论与讨论

(1) 巴颜喀拉地块中东段在汶川 8 级地震前多次出现红外升温异常,震后持续 4 年 7 个月无升温异常,在芦山 7 级地震前再次出现升温异常,据此认为 2006 年至汶川地震前出现的红外升温异常与汶川 8 级地震存在关联,2013 年出现的红外升温异常与芦山 7 级地震存在关联。汶川地震前升温异常出现的频次和幅度均大于芦山地震前,分析认为这可能与 2

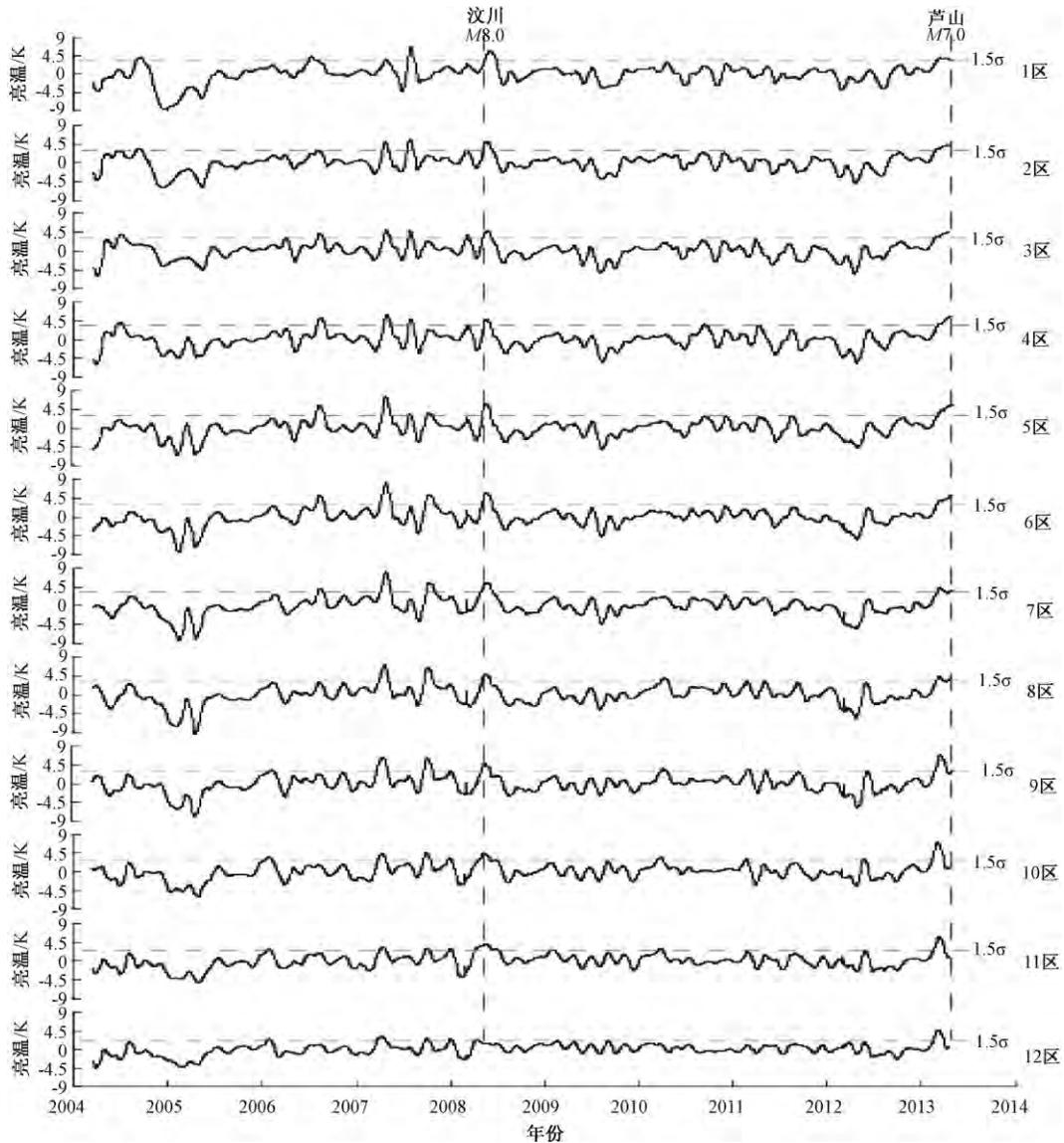


图3 巴颜喀拉地块中东段12个小区5阶小波亮温低频数据与背景场差值曲线

次地震的震级差异有关。

(2) 2006年7~8月升温时段,异常高值区位于5区(图4(a)),2007年3~5月升温时段,异常高值区位于6区和7区(图4(b)),2007年9~10月升温时段,异常高值区位于8区和9区(图4(c)),2007年12月~2008年1月升温时段,异常高值区位于10区(图4(d)),在汶川地震前的这几次大幅度升温异常中,异常高值区在空间上有逐渐往龙门山断裂带迁移的特点。芦山地震前唯一的一次升温异常的高值区位于9区和10区(图4(f)),直接靠近龙门山断裂带。

(3) 在汶川地震前的5次升温异常中,2007年12月之前出现的3次异常,巴颜喀拉地块中东段内部升温幅度差异达4.4K以上(图4(a)、(b)、(c)),2007年12月以后出现的2

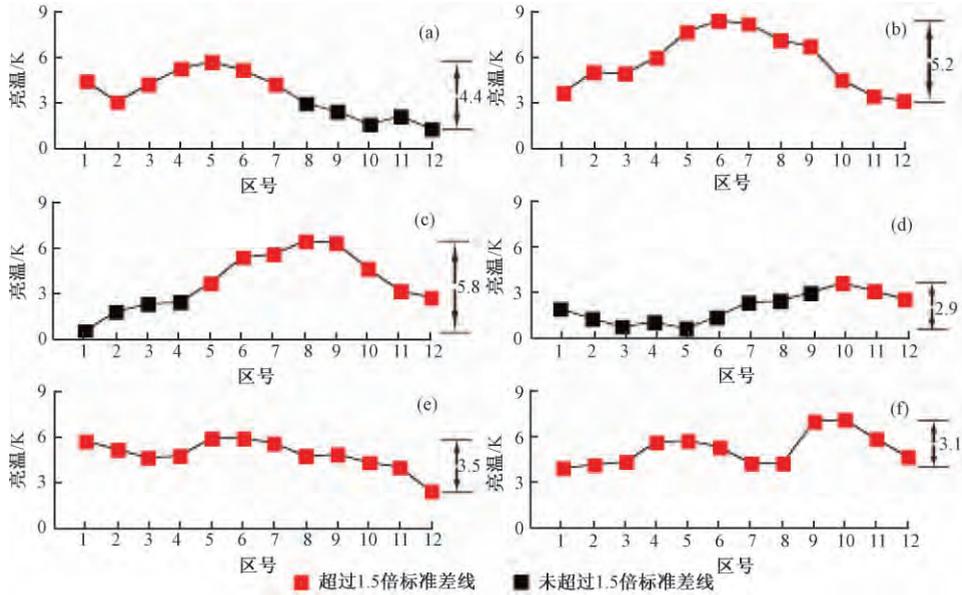


图4 巴颜喀拉地块中东段内部升温幅度的空间分布图

(a) 2006年7~8月; (b) 2007年3~5月; (c) 2007年9~10月; (d) 2007年12~2008年1月; (e) 2008年4~6月; (f) 2013年2~4月

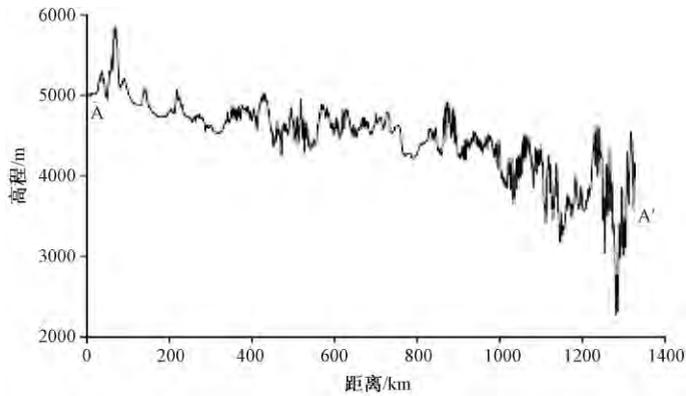


图5 巴颜喀拉地块中东段高程图

次异常,地块内部升温幅度差异变小,在3.5K以下(图4(d)、(e));在芦山地震前唯一的一次升温异常中,地块内部升温幅度差异小,为3.1K(图4(f))。在临近汶川和芦山地震的2次升温异常中(图4(e)、(f)),不仅12个小区间升温幅度差异小,而且12个小区全在震前出现超过1.5倍标准差线的异常。这可能表明,各小区间升温差异变小同时各小区升温幅度均超过1.5倍标准差线即巴颜喀拉地块中东段内部大幅度均衡升温是该地区强震临近的信号。

本文结果表明,巴颜喀拉地块中东段内部大幅度升温(包含大幅度非均衡和均衡升温)对该地区强震有一定的预警意义。但本文主要对巴颜喀拉地块中东段红外亮温的异常现象

作了总结分析,取得了初步认识,文中所用资料时间长度只有 9 年多,相对于强震孕育的大时间尺度而言数据分析时长还比较短,上述分析讨论还有待更长时间的资料和更多震例给予验证。

致谢:感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见与建议。

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,地震地质,25 (1),100 ~ 108。
- 陈顺云、马瑾、刘培洵等,2012,利用卫星遥感获取现今构造活动信息的热物理指标研究,中国科学,42 (2),211 ~ 216。
- 陈顺云、刘培洵、刘力强等,2011,遥感与实测地表温度的对比分析及在地震研究中的意义,地球物理学报,54 (3),747 ~ 755。
- 刁桂苓、王晓山、高国英等,2010,以震源机制类型划分汶川、玉树地震构造块体归属,地球物理学报,53 (8),1779 ~ 1783。
- 郭晓、张元生、魏从信等,2014,2008 年于田 $M_s7.3$ 和 2010 年玉树 $M_s7.1$ 两次地震前中波红外遥感异常研究,地震学报,36 (2),175 ~ 183。
- 荆风、申旭辉、康春丽等,2012,2010 年新西兰 $M7.1$ 地震前的长波辐射变化特征,地球科学进展,27 (9),979 ~ 986。
- 荆风、申旭辉、张铁宝等,2013,与地震有关的活动断裂带红外辐射变化特征,国土资源遥感,25 (1),56 ~ 60。
- 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,西北地震学报,25 (1),12 ~ 15。
- 康春丽、张艳梅、刘德富等,2009,汶川 8.0 级大地震的长波辐射征象,地震,29 (1),116 ~ 120。
- 李琪、林云芳、曾小苹,2006,应用小波变换提取张北地震的震磁效应,地球物理学报,49 (3),855 ~ 863。
- 刘德富、罗灼礼、彭克银,1997,强烈地震前的 OLR 异常现象,地震,17 (2),126 ~ 132。
- 刘德富、康春丽,2005,苏门答腊岛 8.7 级大地震前的辐射异常现象,国际地震动态,313 (1),37 ~ 39。
- 李登峰、杨晓慧,2010,小波基础理论和应用实例,北京:高等教育出版社。
- 刘杰、易桂喜、张致伟等,2013,2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M7.0$ 级地震介绍,地球物理学报,56 (4),1404 ~ 1407。
- 刘玉洁、杨忠东,2001,MODIS 遥感信息处理原理与算法,北京:科学出版社。
- 马瑾、陈顺云、扈小燕等,2010,大陆地表温度场的时空变化与现今构造活动,地学前缘,17 (4),1 ~ 14。
- 彭玉华,1999,小波变换与工程应用,北京:科学出版社。
- 强祖基、钱常恭,1992,青海共和 7 级地震卫星热红外临震增温前兆,现代地质,6 (3),297 ~ 300。
- 强祖基、钱常恭,1998,卫星热红外图像亮温异常—短临震兆,中国科学(D 辑),28 (6),564 ~ 573。
- 魏从信、张元生、郭晓等,2013,玉树 7.1 级地震热红外与长波辐射异常,地球物理学进展,28 (5),2444 ~ 2452。
- 王卫民、赵连锋、李娟等,2008,四川汶川 8.0 级地震震源过程,地球物理学报,51 (5),1403 ~ 1410。
- 解滔、杜学彬、刘君等,2013,汶川 $M_s8.0$ 、海地 $M_w7.0$ 地震电磁信号小波能谱分析,地震学报,35 (1),61 ~ 71。
- 徐秀登、强祖基、钱常恭,1990,突发性地面增温与临震前兆—以 1988 年澜沧、耿马 7.6、7.2 级地震为例,地震地质,12 (3),243 ~ 250。
- 张培震、邓起东、张国民等,2003,中国大陆的强震活动与活动地块,中国科学(D 辑),3 (增刊),12 ~ 20。
- 张培震、徐锡伟、闻学泽等,2008,2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因,地球物理学报,51 (4),1066 ~ 1073。
- 张璇、张元生、魏从信等,2013,四川芦山 7.0 级地震卫星热红外异常解析,地震工程学报,35 (2),272 ~ 277。
- 曾祥方、罗艳、韩立波等,2013,2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s7.0$ 地震:一个高角度逆冲地震,地球物理学报,56 (4),1418 ~ 1424。
- 张元生、郭晓、魏从信等,2011,日本 9 级和缅甸 7.2 级地震热辐射表现特征,地球物理学报,54 (10),2575 ~ 2580。
- 张元生、沈文荣、徐辉,2002,新青 8.1 级地震前卫星热红外异常,西北地震学报,24 (1),1 ~ 4。

Analysis on brightness temperature of satellite infrared in the central-eastern Bayan Har block before and after the Wenchuan and Lushan earthquakes

Zhang Tiebao Lu Qian Xin Hua Liu Fang

Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract In this paper, the low frequency of infrared brightness temperature of central-eastern Bayan Har block before and after the Wenchuan and Lushan earthquakes is extracted and analyzed by the wavelet method based on the remote sensing infrared data from MODIS/TERRA. The results show that: (1) 5 sharply infrared brightness temperature increasing anomalies occurred 2 years ago before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, while there was none of the same anomaly after the quake in 5 years until a new one appeared 2 months before the Lushan $M_s7.0$ earthquake. (2) In spatial, the high value abnormal region migrated towards Longmenshan fault zone gradually over time. (3) Only 2 of all the 6 anomalies are impending ones, which are from April to June, 2008, and from February to April 19, 2013, respectively. The sharply temperature increasing phenomenon in the central-eastern Bayan Har block may be the strong earthquake indicator of this region.

Key words: MODIS Infrared remote sensing Bayan Har block Wenchuan earthquake Lushan earthquake