

卢显、孟庆岩、顾行发等,2015,基于 HJ-1B 卫星的玉树 M_s 7.1 地震地表温度异常识别,中国地震,31(4),679~687。

基于 HJ-1B 卫星的玉树 M_s 7.1 地震 地表温度异常识别

卢显^{1,2)} 孟庆岩²⁾ 顾行发²⁾ 张晓东³⁾ 马未宇¹⁾

1) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京市朝阳区大屯路甲 20 号 100101

3) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

摘要 基于中国 HJ-1B 卫星热红外数据,对 2010 年玉树 M_s 7.1 地震区进行地表温度(LST)研究。研究结果显示,2010 年 4 月初 LST 异常值最初出现在毗邻震中的西南部,并且主要沿属于应力增强区的扎那曲-着晓断裂和杂多-上拉秀断裂分布;之后异常幅度逐渐增强,异常区域逐渐扩大至震中区域,但主要高值异常区依然位于震中西南部且沿着断裂带分布,显示出地表升温异常与断裂构造的相关性;在地表温度变化的过程中,4 月 14 日发生了玉树 M_s 7.1 地震,然后异常现象逐渐减弱,4 月 26 日异常区域的 LST 值明显低于 18 日的数值并逐渐消散,5 月中下旬该区域 LST 值恢复至正常状态;地震前后的 LST 异常呈出现-扩散集中-衰减-消失的变化过程。同时,以相同方法和标度计算了 2009 年同区域、同时段的 LST 值作为背景信息,进一步印证了 2010 年 4 月 14 日青海玉树 M_s 7.1 地震 LST 临震异常的可靠性。

关键词: HJ-1B 卫星 地表温度 玉树地震

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0679-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震前出现热异常是一种比较普遍的自然现象,应用卫星遥感技术监测地震前的热异常现象是地震预测研究的新探索。自 20 世纪 80 年代末以来,国内外科学家开展了大量的遥感卫星监测地震的研究,并将该方法应用于地震预测实践。Tronin(1996)对中亚地区过去 10 年约 10000 景 NOAA 卫星 AVHRR-2 通道热像进行系统分析,证实中亚地区震前的卫星热红外异常(平均 $1\sim 5^{\circ}\text{C}$)与该区地震活动存在显著的统计相关性。刘德富等(1997、1999)利用卫星红外通道的长波辐射(OLR)资料研究异常与地震的对应关系。Tramutoli 等(2001)提出一种基于统计的 RST(Robust Satellite Technique)方法并且在震前数周发现了红外时空

[收稿日期] 2014-11-25; [修定日期] 2015-04-02

[项目类别] 中国科学院亚洲空间减灾科学合作研究项目(Y3YI2702KB)和高分辨率对地观测系统重大专项应用示范一期(31-Y30B09-9001-13/15)共同资助

[作者简介] 卢显,女,1985 年生,助理研究员,主要从事数字地震学和卫星遥感应用研究。E-mail:luxian@radi.ac.cn

孟庆岩,通讯作者,男,1971 年生,研究员,主要从事地震遥感和生态环境定量遥感等研究。

E-mail:mengqy@radi.ac.cn

异常变化。Ouzounov 等(2003)发现强震前固体地球和大气/海洋间存在着某种联系,尤其是地震发生前的热红外 LST 变化比较明显。康春雨等(2003)发现,在昆仑山 8.1 级地震发生前 1 个月长波辐射强度(OLR)出现异常增强,震前 6~7 天出现亮度温度的增强,异常现象在空间分布上呈现条带状,与震中区的构造分布一致。邓志辉等(2003)通过对 2000 年中国大陆发生的 3 次 6 级以上地震的卫星红外异常特征的初步分析,得出卫星红外异常的分布与地质构造,特别是活动断裂的关系密切,且地震震中常位于红外温度的相对高值异常的边缘或附近,异常的发展具有非对称性,异常一般都是从震中附近的某一侧向震中区扩展的结论。张元生等(2011)研究发现日本 9.0 级和缅甸 7.2 级地震发生前也存在显著的亮温变化。崔月菊等(2011)、解杨春等(2012)都针对 MODIS 数据,采用劈窗算法反演了玉树地震的地表温度,反演结果表明震前确实存在高值异常。魏从信等(2013)应用风云卫星数据,研究了玉树 $M_s7.1$ 地震的亮温和长波辐射异常,发现震前 1 个月出现了异常现象。郭晓等(2014)以静止卫星中波红外亮温为数据源,应用功率谱相对变化法对玉树 $M_s7.1$ 地震进行研究,发现震前出现了不同程度的功率谱信息增强现象。

从观测井获得的水温和气象台站收集到的气温等数据,都由于局限于台网的定点观测,而使得利用地表温度异常预测地震具有一定的局限性。将空间热红外遥感技术引入地震科学领域则为地震预测的前兆观测方法特别是对孕震区的立体环境观测提供了新的技术手段(吕琪琦等,1998)。本文应用中国资源环境卫星的热红外数据提取玉树地震发生前后 LST 的变化信息,研究其时空变化特征,并对热红外地表温度异常与地震的关系进行初步的探讨。

1 研究区域及数据

1.1 研究区域及地震活动

2010 年 4 月 14 日 07 时 49 分 37 秒,青海省玉树县发生 $M_s7.1$ 地震,震中(33.22°N, 96.58°E)位于甘孜-玉树断裂带上(图 1)。该断裂是青藏高原内部的一条大型走滑断裂带,同时也是川滇菱形块体重要的边界断裂(周荣军,1997)。该断裂在大地构造上位于金沙江台缘带内,是玉树-玉隆断拗的南界断裂。断裂形成于早华立西期,印支期有过强烈运动,以后以推覆活动为主,是一条长期活动的断裂,第四纪以来有明显的活动(闻学泽,1985;Wang et al, 2008)。该断裂带还是广义的鲜水河断裂向西北延伸的部分,也是青藏高原川滇菱形块体向东挤出的北部边界,其结构较为复杂(闻学泽,1985;周荣军等,1996;冉洪流等,2006;Wang et al, 2008;任俊杰等,2010)。

本文将玉树 $M_s7.1$ 地震前 30°~36°N、94°~100°E 研究区内 2009 年 1 月 1 日 0 时 0 分~2010 年 4 月 14 日 07 时 49 分 $M_L \geq 3.5$ 的地震进行了统计,同时计算了每个地震与玉树地震震中的距离,结果见表 1。

2009 年 1 月 1 日~2010 年 4 月 14 日研究区 $M_L \geq 3.5$ 地震与玉树地震震中的间距(图 2)显示,玉树 $M_s7.1$ 地震前中小地震无论在频度和强度上还是在时间和空间上均有向未来震中聚集的现象,特别是 2010 年 4 月 14 日 05 点 39 分 $M_L5.2$ 地震,其距离玉树地震震中仅有 11km,具有明显的前震特征,为探索利用前震进行地震预测提供了较好的研究案例。

1.2 卫星数据

2008 年 9 月,“2+1”模式中编号为 A(简称“HJ-1A”)和 B(简称“HJ-1B”)的 2 颗卫星在

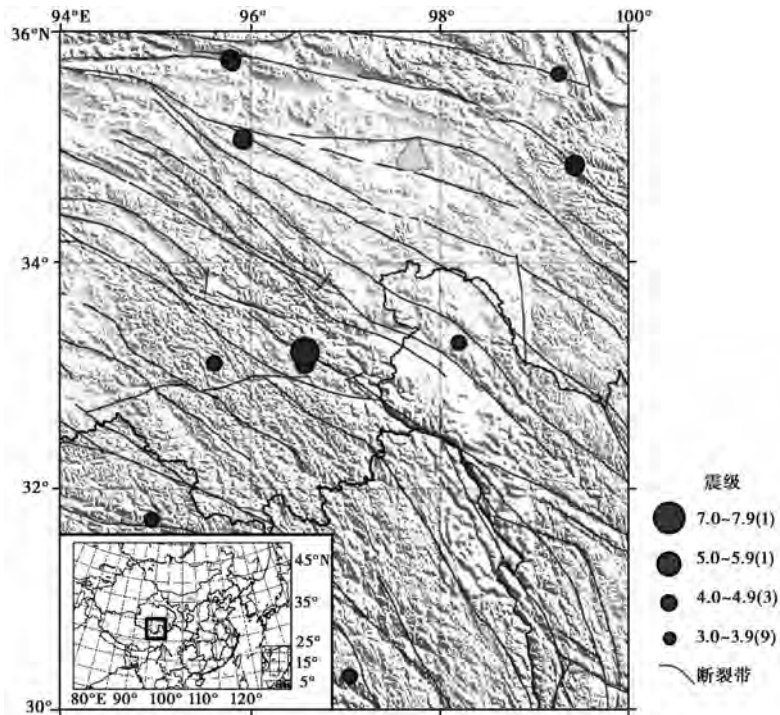


图 1 玉树地震构造图

太原卫星发射中心成功发射。HJ-1A 搭载有 2 个 CCD 传感器和 1 个高光谱成像仪, HJ-1B 搭载有 2 个 CCD 传感器和 1 个热红外传感器 IRS。HJ-1B 的 IRS 在近红外和中红外波段, 即 B05、06、07 波段空间分辨率为 150m, 星下点空间分辨率为 300m, 量化等级 10 比特, 幅宽 720km, 重访周期为 4 天(李家国, 2010)。

地表温度广义上为地表的皮肤温度, 地表温度反演是热红外遥感量化最主要的应用领域。大气在热红外谱段(7~18 μm)内, 大气分子和悬浮粒子有明显的吸收作用, 大气中的水汽、二氧化碳、臭氧、一氧化碳和甲烷等气体分子对红外线有选择性吸收作用。其中水汽对红外辐射的吸收能力最明显, 水汽吸收带占有较宽的波段, 且主要集中在红外波段区域。云雾对来自地表的红外长波辐射具有强烈的吸收

表 1 2009 年 1 月 1 日~2010 年 4 月 14 日
研究区 $M_L \geq 3.5$ 地震

发震日期	北纬 /(°)	东经 /(°)	震级 M_L	与玉树地震 震中的距离/km
2009-01-28	30.05	95.57	3.5	365
2009-02-12	35.63	99.25	3.6	363
2009-05-15	31.73	94.97	3.7	224
2009-08-21	33.30	98.20	3.7	151
2009-09-28	35.75	95.80	4.6	290
2009-09-28	35.77	95.78	3.9	293
2009-10-23	34.85	99.42	4.5	318
2009-10-24	34.82	99.42	3.8	316
2009-12-24	30.32	97.05	3.6	326
2010-02-24	33.12	95.63	3.9	89
2010-03-02	35.72	95.82	3.5	287
2010-03-06	35.07	95.93	4.8	214
2010-04-14	33.12	96.58	5.2	11
2010-04-14	33.22	96.58	7.4	0

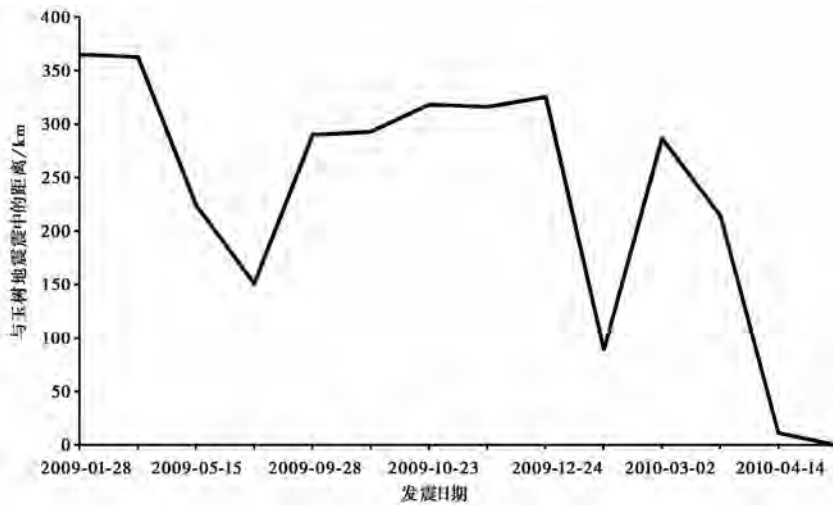


图2 2009年1月1日~2010年4月14日研究区 $M_L \geq 3.5$ 地震与玉树地震震中的间距

作用;因此,如果天空有云或雾时,来自地表的热红外辐射几乎被全部挡住,热红外传感器就很难探测到来自地表的热辐射,只能反映云顶或雾顶的亮温。本研究数据采用 HJ-1B 热红外波段 (IRS4) 的产品,为了排除日照和云的干扰,图像均为凌晨时段的晴空图像,其中 2009、2010 年的图像共 18 幅。

1.3 处理方法

普朗克辐射方程和能量守恒定律是热红外遥感的基础(徐冠华,2000)。对于非黑体(灰体)的辐射,普朗克辐射方程应乘以同温下该物体发射率,即某一波长物体的发射量与其同温下黑体发射量的比值。同时,亮度温度就是物体的辐射能量用同辐射量的黑体温度表示,它可以表征亮度与地表温度之间的关系。 $L_{bb}(T_b, \lambda)$ 与 $L_{gb}(T_g, \lambda)$ 分别代表黑体温度和灰体温度下的光谱辐射率 ($W \cdot Sr^{-1} \cdot m^{-3}$),即在地表温度 T 下单位波长通过单位面积单位立体角的辐射通量。

$$L_{bb}(T_b, \lambda) = \frac{\beta}{\lambda^5 (e^{\alpha/\lambda T_b} - 1)} \quad (1)$$

$$L_{gb}(T_g, \lambda) = \frac{\varepsilon \beta}{\lambda^5 (e^{\alpha/\lambda T_g} - 1)} \quad (2)$$

式中, T_b 、 T_g 为地表温度(K); λ 为射出辐射波长(m); ε 为地表比辐射率,参照覃志豪单窗算法(Qin et al, 2001)中的比辐射率数据; $\alpha = hc/K$ (mK), $\beta = 2hc^2/\lambda$ (Wm^2), 其中 h 为普朗克常量,其值为 6.626×10^{-34} (J·s); C 为光速,其值为 2.998×10^8 m/s, K 为玻耳兹曼常量,其值为 1.38×10^{-23} J/K; Artis 等(1982)认为,辐射亮温仅仅代表了黑体温度,而自然界的大部分物体并非黑体,所以应该用比辐射率对其进行校正,假设式(1)、(2)分母中的-1可忽略不计,则可以推导出地表温度 T_g 的表达式为

$$T_g = \frac{T_b}{1 + (\lambda T_b/\alpha) \ln \varepsilon} \quad (3)$$

2 研究结果

研究时间段为 2010 年 3~5 月。3 月上旬,研究区域内 LST 没有出现异常现象,但是 2010 年 3 月 14 日,也就是玉树地震发震 1 个月前,在研究区域上空出现一条明显的鱼鳞状云带,且此云带正好贯穿玉树地震震中区域。玉树地震导致的应力变化以破裂带为中心高达正负 1000Pa,沿近 EW 方向应力增加,扎那曲-着晓断裂、莫云-结多断裂、杂多-上拉秀断裂西北段(图 1)都处于应力增强区,其中杂多-上拉秀断裂应力增加尤为显著,应力的增加有利于断裂活动性增强(赵晓燕等,2012)。从研究图像上来看,毗邻震中的西南区 LST 于 2010 年 4 月 10 日出现明显高值异常并且主要沿着扎那曲-着晓断裂和杂多-上拉秀断裂分布,这与 2 条断裂位于应力增强区的结论相吻合。由于受卫星观测周期和天气影响,无法看到此后几天的变化情况,但从后续图像可以分析出异常是逐渐向震中区域扩展并慢慢消散的。4 月 18 日异常区域包含震中区域,主要高值异常区依然位于震中西南区域且沿着断裂带分布,显示出断裂构造与地表升温异常的相关性。4 月 26 日异常区域的地温值明显低于 18 日的地温值并逐渐消散,5 月中下旬该区域 LST 恢复至正常状态。图 3 显示了地震前后 LST 异常的出现-扩散集中-衰减-消失过程,这个明显的地温异常变化过程能够较好地反映出震前异常。LST 异常出现阶段代表着地震能量的孕育阶段,在这个过程中,能量的迅速增加导致地表温度升高;异常集中阶段表示能量已经达到较高值;地震发生后,能量得到释放,地表温度也逐渐降低并恢复正常状态。

为了减少可能对地震信息提取产生干扰的一些因素如天气、植被、地形等的影响,本文以相同方法和标度处理了研究区域内 2009 年同时段的 LST 结果作为背景信息,以对不同时间尺度的红外数据开展时空特征分析。图 4 为 2009 年研究区 LST 演变图,结果显示 2009 年研究区在 3~5 月的 3 个月时间内没有出现大面积的显著高值异常,温度值始终维持在正常状态,从而进一步印证了 2010 年 4 月 14 日玉树地震 LST 临震异常的可靠性。

3 结论与讨论

(1)大量研究表明,地震活动能够引起热辐射异常变化,但由于热辐射变化的复杂性,提取异常的难度较大。本研究采用我国分辨率为 300m 的 HJ-1B 卫星热红外数据进行地表温度异常识别,其具有分辨率及异常识别精度较高、观测范围大且完整的优势,对于国产卫星数据在地震监测方面的应用具有重要的指示意义。

(2)玉树 $M_s7.1$ 地震前,中小地震无论在频度和强度上还是在时间和空间上均有向未来震中聚集的现象,特别是 2010 年 4 月 14 日 05 点 39 分的 $M_s5.2$ 地震,其震中距离玉树地震震中仅 11km,为典型的前震,这说明主震前连续的中小地震具有一定的预测意义。因此对强震前的地表温度进行连续观测,不仅可以得到强震前后的地温变化特征,还可能总结出强震发震前的异常指示标准。

(3)卫星地温研究结果显示,震中西南地区的 LST 于 2010 年 4 月 10 日出现明显高值异常并且主要沿扎那曲-着晓断裂和杂多-上拉秀断裂分布,这可能与 2 条断裂的应力增强有关。大气温度也表明玉树地震前存在温度上升现象,一氧化碳总量在地震前后也有一些高值变化,这些参数的变化很可能是孕育地震的应力场变化引起地下排气增大而引起的(崔月

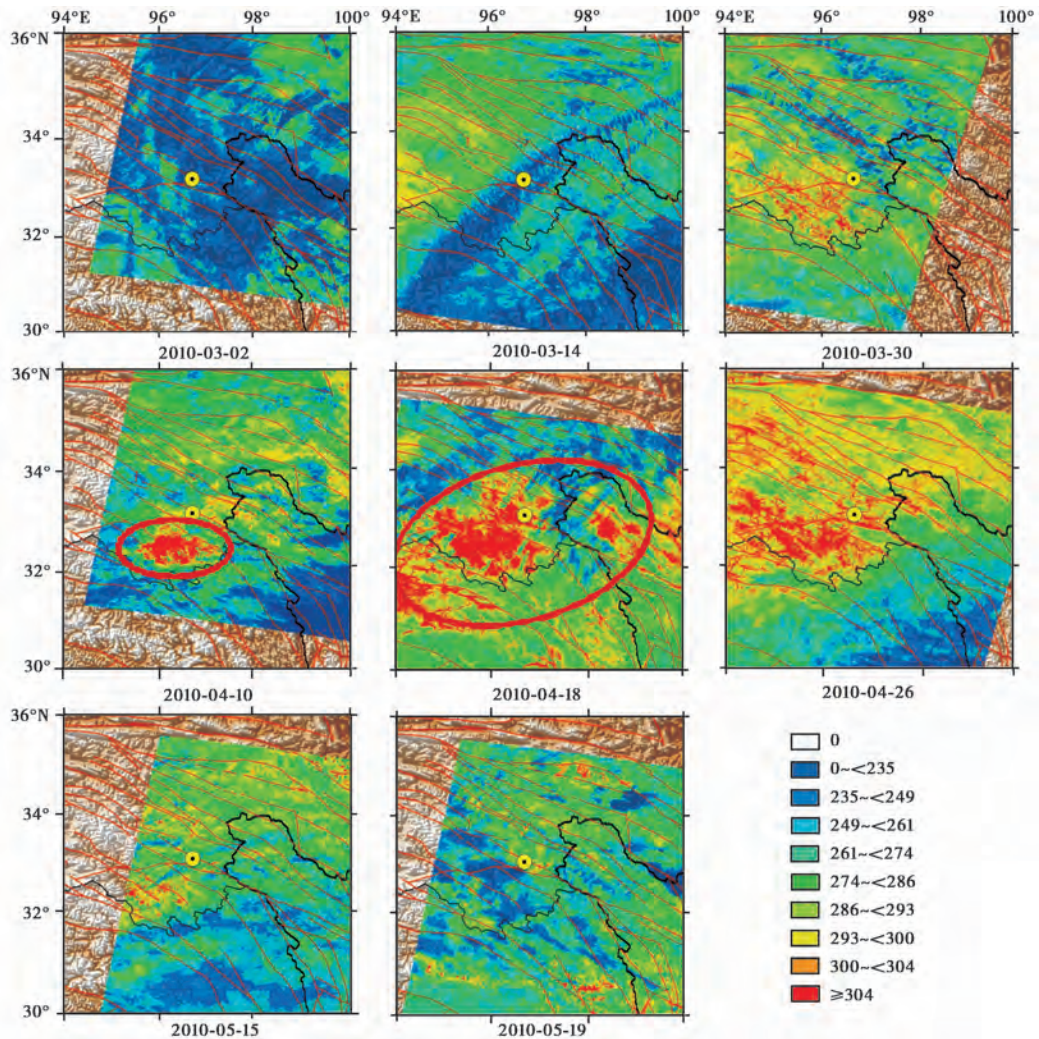


图3 2010年玉树地震前后LST异常演变图
红色圈为异常区域;黄色圆点为玉树地震震中

菊等,2011)。NCEP(National Center for Environmental Prediction)数据计算发现玉树地震震中附近2010年4月8日出现了异常增温现象,甘孜-玉树断裂带方向增温明显(周波等,2012)。本研究成果表明,异常区域在异常值出现后逐渐扩大至震中区域,异常值大于正常值的2倍,主要高值异常区依然位于震中西南区域且沿NW向断裂带分布,显示出断裂构造与地表升温异常的相关性;2010年4月26日异常区域的地温值明显低于同月18日的地温值并逐渐消散,5月中下旬该区域LST恢复至正常状态;地震前后的LST异常呈现出扩散集中-衰减-消失的变化过程,具有较好的临震指示意义。同时,以相同方法和标度计算了2009年同区域、同时段的LST结果作为背景信息,也进一步印证了2010年4月14日玉树地震LST临震异常的可靠性。利用MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)数据反演的地表温度高值异常也是沿NW向断裂带分布,震中区在4月12日形成一定区域的红斑

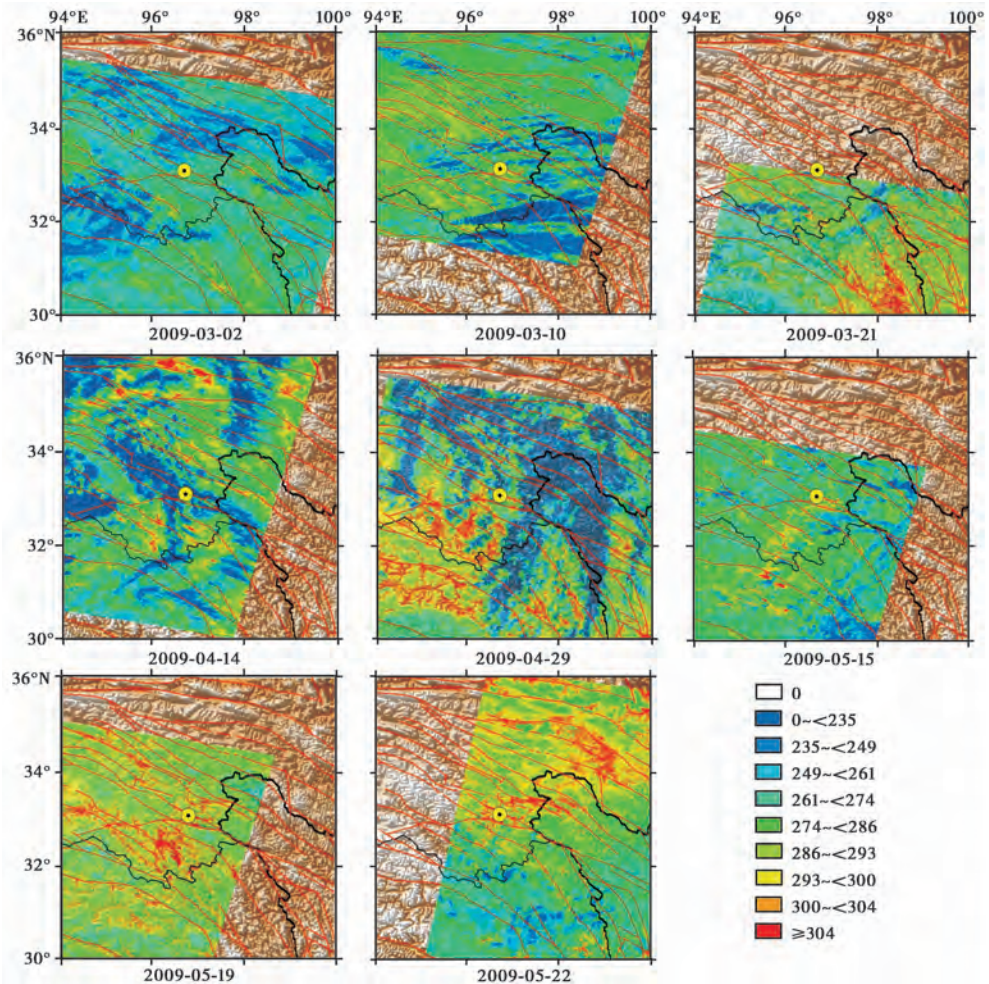


图 4 2009 年研究区 LST 演变图

并且温度在震后降低(解杨春等,2012);热红外亮温和长波辐射异常也都位于玉树地震震中南部区域(魏从信等,2013)。

致谢:感谢中国资源卫星应用中心提供的 HJ-1B 热红外数据以及中国地震局地震预测研究所熊攀博士的图像校正和定标指导。

参考文献

- 崔月菊、杜建国、陈志等,2011,2010 年玉树 $M_s7.1$ 地震前后大气物理化学遥感信息,地球科学进展,2(7),787~794。
- 邓志辉、王煜、陈梅花,2003,中国大陆几次强地震活动的卫星热红外异常分析,地震地质,25(2),327~337。
- 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。
- 解杨春、龚平、熊宗龙,2012,基于 MODIS 数据探讨玉树 $M_s7.1$ 地震前后温度变化,大地测量与地球动力学,32(增刊),25~27。
- 康春丽、陈正位、陈立泽等,2003,昆仑山 8.1 级地震的热红外前兆特征分析,西北地震学报,25(1),12~15。

- 李家国,2010,HJ-1B 热红外波段辐射校正与应用, 博士学位文,北京:中国科学院遥感与数字地球研究所。
- 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、彭克银、刘维贺等,1999,地震有“热征兆”,地震学报,12(6),710~715。
- 吕琪琦、丁鉴海、崔承禹等,1998,张北 6.2 级地震前的卫星热红外异常,地震,18(3),240~244。
- 冉洪流、何宏林,2006,鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级 ($M \geq 6.7$) 及复发间隔研究,地球物理学报,49(1),153~161。
- 任俊杰、谢富仁、刘冬英等,2010,2010 年玉树地震的构造环境、历史地震活动及其复发周期估计,震灾防御技术,5(2),228~233。
- 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。
- 闻学泽,1985,甘孜-玉树断裂带的新构造特征与地震危险估计,地震地质,7(3),23~32。
- 徐冠华,2000,论热红外遥感中的基础研究,中国科学:E 辑,30(8),1~5。
- 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。
- 赵晓燕、盛书中、李翠芹等,2012,玉树地震产生的位移场和应力场研究,地震,32(3),117~124。
- 周波、马未宇、陈聪,2012,玉树地震前 NCEP 异常现象,地震研究,35(3),330~334。
- 周荣军,1997,甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计,地震地质,19(2),115~124。
- 周荣军、马声浩,1996,甘孜-玉树断裂带的晚第四纪活动特征,中国地震,12(3),250~260。
- Artis D A, Carnahan W H, 1982, Survey of emissivity variability in thermography of urban areas, Remote Sensing of Environment, 12(4), 313~329。
- Ouzounov D, Freund F, 2003, Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data, Adv Space Res, 33, 268~273。
- Qin Z, Karnieli A, Berliner P, 2001, A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region, International Journal of Remote Sensing, 22(18), 3719~3746。
- Tramutoli V, Bello G D, Pergola N, et al, 2001, Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas, Ann Geofis, 44, 295~312。
- Tronin A A, 1996, Satellite thermal survey—a new tool for the studies of seismoactive regions, Int J Remote Sens, 17, 1439~1455。
- Wang S, Fan C, Wang G, et al, 2008, Late Cenozoic deformation along the northwestern continuation of the Xianshuihe fault system, Eastern Tibetan Plateau, Geological Society of America Bulletin, 120(3-4), 312~327。

Land surface temperature anomaly recognition of the Yushu $M_s7.1$ earthquake based on the HJ-1B satellite data

Lu Xian^{1,2)} *Meng Qingyan*²⁾ *Gu Xingfa*²⁾ *Zhang Xiaodong*³⁾ *Ma Weiyu*¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Institute of Remote Sensing and Digital Earth, China Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract Land surface temperature (LST) of the 2010 Yushu $M_s7.1$ earthquake is studied by using the Artis algorithm based on the HJ-1B satellite thermal infrared data, and the land surface temperature anomaly identification and test before and after the earthquake is completed. The results show that the initial LST anomaly appeared in the southwest of the epicenter on April 10, 2010, and located along the main stress intensification areas, such as the Zanaqu-Zhoxog fault and Zadoi-Shanglaxiu fault. Then the abnormal area expanded gradually to the epicenter, but the mainly high anomaly area was still in the southwest of the epicenter and along the fault zone, which indicates the correlation between the faults and the LST anomaly. LST values of abnormal area on April 26 were significantly lower than the values on April 18 and gradually dissipated, and LST of this region returned to a normal state in late May. LST abnormality before and after the earthquake shows the anomaly change process of anomaly appearance-diffusion and concentration-decaying-disappearing. The pre-earthquake abnormality is evident. At the same time, this paper also calculates the LST results of the same period in 2009 of the same research area as the background information, which further confirms the reliability of LST anomalies as imminent earthquake precursors of the April 14, 2010 Yushu earthquake, Qinghai.

Key words: HJ-1B satellite LST The Yushu earthquake