

解滔、郑晓东、康春丽等,2015,2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震热红外亮温异常分析,中国地震,31(1),101~109。

2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震 热红外亮温异常分析

解滔^{1,2)} 郑晓东¹⁾ 康春丽²⁾ 卢军²⁾ 马未宇²⁾

1) 中国石油勘探开发研究院,北京市海淀区学院路20号 100083

2) 中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街5号 100045

摘要 为了分析2014年2月12日新疆于田 $M_s7.3$ 地震的热红外亮温异常,收集了以震中为中心 $30^\circ\sim 45^\circ\text{N}$ 、 $70^\circ\sim 95^\circ\text{E}$ 范围内由中国静止气象卫星FY-2E观测的亮温资料,资料时间段为2012年5月1日~2014年4月30日。应用连续小波变换方法计算了每一个像元的小波相对能谱,得到了分析区域内相对能谱的时空演化过程。分析结果显示,从2013年10月开始相对能谱在震中附近出现异常,随后异常逐渐扩大并向阿尔金断裂带和西昆仑断裂带东段区域扩展。从同年11月开始塔里木盆地西缘的中天山、南天山和西昆仑区域断裂带西段开始出现异常,之后异常区域进一步扩大并向断裂带迁移,最终形成沿塔里木盆地周围断裂带分布的带状异常区域,异常在2013年12月下旬和2014年1月上旬达到峰值。随着地震的临近,异常区域开始减小,异常幅度也开始减弱,至地震发生时震中区附近异常已经消失,但在阿尔金断裂和中天山区域异常仍存在。于田地震发生后异常迅速衰减,2014年2月下旬异常基本消失。

关键词: 于田地震 亮温 热红外 异常 小波变换

[文章编号] 1001-4683(2015)01-0101-09

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

2014年2月12日17时19分,新疆于田发生 $M_s7.3$ 地震,据中国地震台网中心测定,震中位于 36.1°N , 82.5°E (图1),震源深度为12km,地震前1天的10时14分曾发生于田 $M_s5.4$ 地震。 $M_s7.3$ 主震后余震活动频繁,最大余震为2月12日17时24分发生的 $M_s5.7$ 地震(<http://www.ceic.ac.cn/>)。国内外许多科学家和研究团队一直致力于地震前兆以及地震预测研究,随着卫星遥感技术在地震研究中的应用,与地震及构造活动有关的热红外异常现象也相继见诸报道(强祖基等,1990、1998;单新建等,2005;屈春燕等,2006a;张元生等,2002、2011;Gorny et al,1988;Tronin et al,2002;Xie et al,2013)。为了从复杂的温度背景变化中识别出与地震有关的异常信息,国内外科学家提出了一些数据处理方法并应用于震例研究和预测实践中(屈春燕等,2006b;马晓静等,2009;Ouzounov et al,2004;Blackett et al,

[收稿日期] 2014-05-29; [修定日期] 2014-10-08

[项目类别] 国家科技支撑计划专题(2012BAK19B02-03)和中国地震局震情跟踪课题(2015010401)共同资助

[作者简介] 解滔,男,1986年生,助理研究员,主要从事地震电磁学及卫星热红外遥感应用研究。

E-mail: xtaolake@163.com

2011)。有关地震热异常的机理分析和实验研究也相继展开。由于岩层的热导率非常低,震源深度由断层机械活动产生的温度变化需要很长的时间才能传递到地表,因而地震临近阶段地下气体溢出率的增加和热对流的加强有可能是引起孕震区及邻区地表温度上升的主要因素(强祖基等,1991、1992;Tronin,1996、2000)。

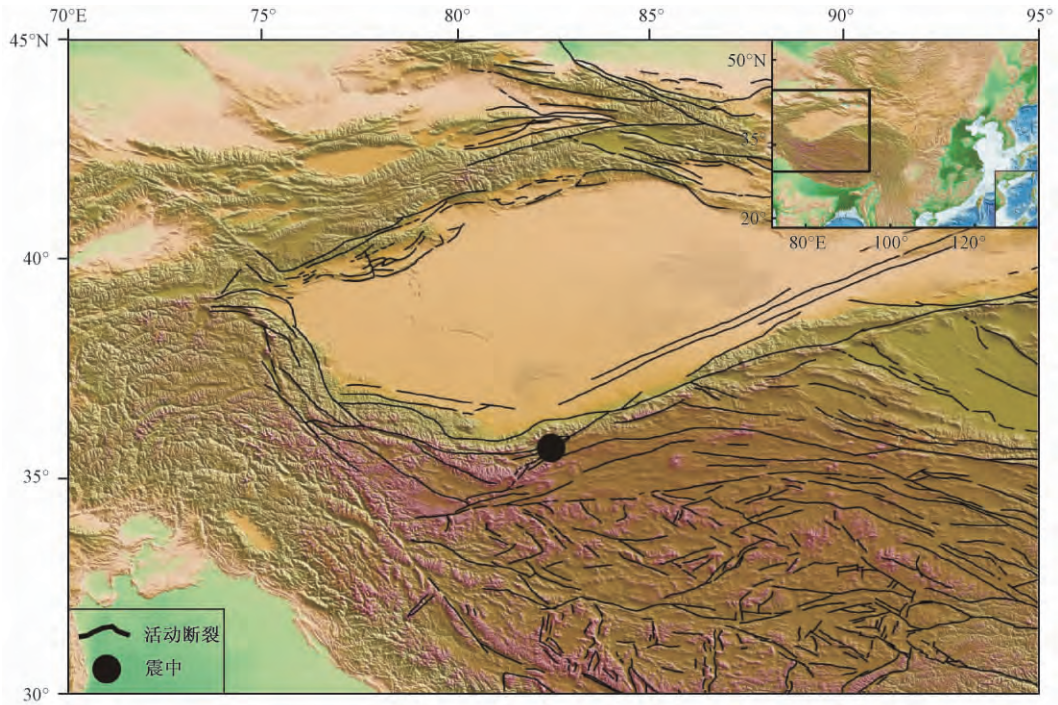


图1 2014年2月12日于田地震震中位置及周围主要活动断裂

为了研究2014年于田 $M_s7.3$ 地震前是否存在热红外辐射异常以及热异常在时间、空间上的分布特征,我们收集了于田地震震前、震后 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}N$ 、 $70^{\circ} \sim 95^{\circ}E$ 范围内由中国静止气象卫星FY-2E记录的为期2年的热红外遥感亮温资料,应用小波相对能谱方法对亮温资料进行了处理,得到了分析区域内小波相对能谱的时空演化图像。分析结果显示,于田地震震前沿塔里木盆地的中天山、南天山、西昆仑和阿尔金断裂带出现了突出的热红外异常,地震即发生在异常区域内。

1 亮温资料

FY-2E静止气象卫星于2008年12月发射,运行轨道定点于 $105^{\circ}E$ 赤道上空,有效观测范围为 $60^{\circ}S \sim 60^{\circ}N$ 、 $45^{\circ} \sim 165^{\circ}E$,于2009年11月开始提供有效的亮温数据服务,用户可从风云卫星遥感数据服务网(<http://fy3.satellite.cma.gov.cn/PortalSite/default.aspx>)下载亮温产品数据。远红外观测波段分别为 $10.3 \sim 11.3$ 、 $11.5 \sim 12.5 \mu m$,热红外亮温观测每小时进行1次,空间分辨率约5km。静止卫星与观测像元的相对位置几乎是固定的,像元到卫星的热辐射传播路径也相应是固定的。卫星观测的地表温度图像以及计算分析处理得到的小波相对能谱图像可依据各像元的坐标直接绘制,无需如极轨卫星的轨道拼接过程。白天太

阳照射会使地表温度相对于夜间大幅上升,难以将由于构造活动和地震引起的地表温度小幅变化的区域从周围背景区域中区分出来;同时由于光照条件不同,各区域日间地表温度存在差异,不利于异常的识别,因此选取地方时夜间 00:00 ~ 04:00 的 5 次观测数据进行分析。

2 分析方法和数据处理

2.1 小波能谱分析

小波变换是一种分析非稳态信号的有效方法,在地球物理学、地震勘探和信号处理等研究中已得到广泛应用(Kumar et al, 1997)。该方法是线性时-频分析方法。当改变时间-频率窗口形状时,可很好地解决时间分辨率和频率分辨率之间的矛盾,在时间域和频率域都有很好的局部化性质。小波变换具有多分辨率的特点,可以对各周期分量进行时间定位。有限时间序列 $f(t)$ 的小波变换定义为如下积分形式

$$W_\psi f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

式中,* 表示对 $\psi_{a,b}(t)$ 取复共轭; a 是尺度伸缩因子,用于控制变换的频率分辨率; b 是时间平移因子, a 和 b 均为无量纲参数; $W_\psi f(a, b)$ 表示经小波变换后的信号各频段分量。

$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 是小波母函数,这里我们选择 Morlet 小波。常用的复值 Morlet 小波在频率域为

$$\psi(\omega) = \pi^{-1/4} e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2}} \quad (2)$$

当 $\omega_0 \geq 5$ 时,式(2)近似满足容许条件(Farge, 1992),本文将 ω_0 取值为 6。由于 Morlet 小波在时间域和频率域均为复数,经小波变换后的各频段信号分量 $W_\psi f(a, b)$ 也是复数,因而可以提取信号的振幅和相位信息。小波能谱通常定义为振幅的平方 $|W_\psi f(a, b)|^2$,小波能谱可在时间域得到信号各频谱成分随时间的变化。由于各像元所处的纬度、海拔高度以及气候环境等因素存在差异,使得不同像元的能谱信息本身就有差异,从而在空间上造成由地形引起的异常现象。因此,我们按照下式计算各频段的相对能谱变化

$$R_w(a, b) = |W_\psi f(a, b)|^2 / \overline{W^2}(a, b) \quad (3)$$

式中, $\overline{W^2}(a, b) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} |W_l f(a, b)|^2$ 是各频段全局小波能谱,表示在整个时段内将小波能谱取平均; N 为数据长度。对每一频段, $R_w(a, b)$ 表示各时刻能谱与 2 年能谱平均值的比值。

Torrence 等(1998)讨论了连续小波变换的边界效应,发现在临近数据边界处,小波能谱呈现衰减状态;频段值越低,衰减时间越长。其分析结果表明,在边界处计算的能谱值要低于数据实际的能谱值;如果在边界处出现能谱异常,那么实际的异常幅度会更大,因此小波能谱分析方法不会在边界效应中产生虚假异常。由于连续小波变换是非正交变换,相邻频段信息中有重叠的成分,因此不需要太高的频率分辨率,本文取 0.5 为间隔对 a 进行离散化处理(Torrence et al, 1998)。 b 表示变换后的时间,不参与计算。对每个像元 1 次计算选取 2 年的数据资料,数据长度 $N = 730$ (包含闰年时 $N = 731$)。应用连续小波变换对数据进行处理时,在获得相对能谱时频信息后,对研究区域进行时空扫描,分析异常区域的空间、时间演

化特征。

2.2 数据处理

首先采用补窗法对像元每天 5 个时间点的亮温资料进行处理,去除短时间内云层对数据的部分影响,而后取其平均值作为该像元这 1 天的观测值,对所有像元每天数据进行处理得到每一像元的日值序列(张元生等,2011)。图 2(a)中黑色细线是于田地震震中区像元(36.1°N,,82.5°E)2012 年 5 月 1 日~2014 年 4 月 30 日的亮温日值数据。像元上空有云层存在时,卫星观测到的亮温反映的是云顶的温度,云顶温度要比云层下地表温度低许多。为进一步去除云层的影响,用低通滤波器提取亮温日值序列中周期 $T \geq 1$ 年的趋势成分(图 2(a)中粗实线),计算亮温数据与其趋势成分的均方差,并以 1.5 倍均方差作为下限阈值(图 2(a)中粗虚线)进行简单的去云处理,认为小于 1.5 倍均方差下限的值是受云的影响,用趋势成分中相应的值进行代替,经处理后的亮温曲线如图 2(b)所示。

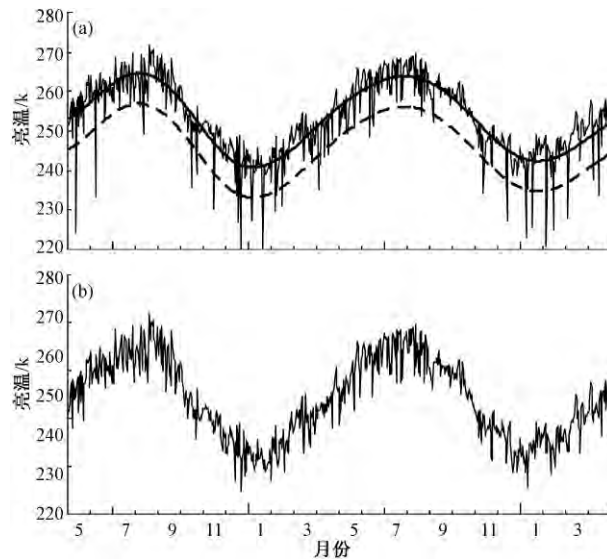


图 2 2012 年 5 月 1 日~2014 年 4 月 30 日亮温资料

(a) 原始记录;(b) 经 1.5 倍均方差去云后

粗实线为年周期以上成分;粗虚线为 1.5 倍均方差阈值

从图 2(b)中可以看出,经去云处理后的亮温数据中仍然含有许多短期波动,短期波动的能谱主要集中在频率较高的频段。为此,我们应用连续小波变换分别对每一像元亮温资料独立进行计算,以便每一像元的计算结果不会受到其他像元影响。在对所有像元计算结束后,依据像元经纬度坐标将同一日期的小波相对能谱值进行绘图,之后利用时频剖面法对计算结果进行时频扫描,提取有用信息并予以分析。

3 结果分析

尽管采用了补窗法和 1.5 倍均方差阈值对资料进行了去云处理,但小波相对能谱图像中仍然存在一些离散的噪声异常像元。为了分析可能与构造活动及地震有关的异常信息,我们认为主要异常像元需集聚成一定规模的异常区域,而非零星离散分布,同时异常区域应

沿构造断裂带分布,尤其是活动断裂带。

对分析时段内小波相对能谱时空演化进行检测后发现,2014年于田 M_s 7.3 地震前沿塔里木盆地周围断裂带出现了显著的热红外异常现象(图3)。2013年10月开始在震中附近

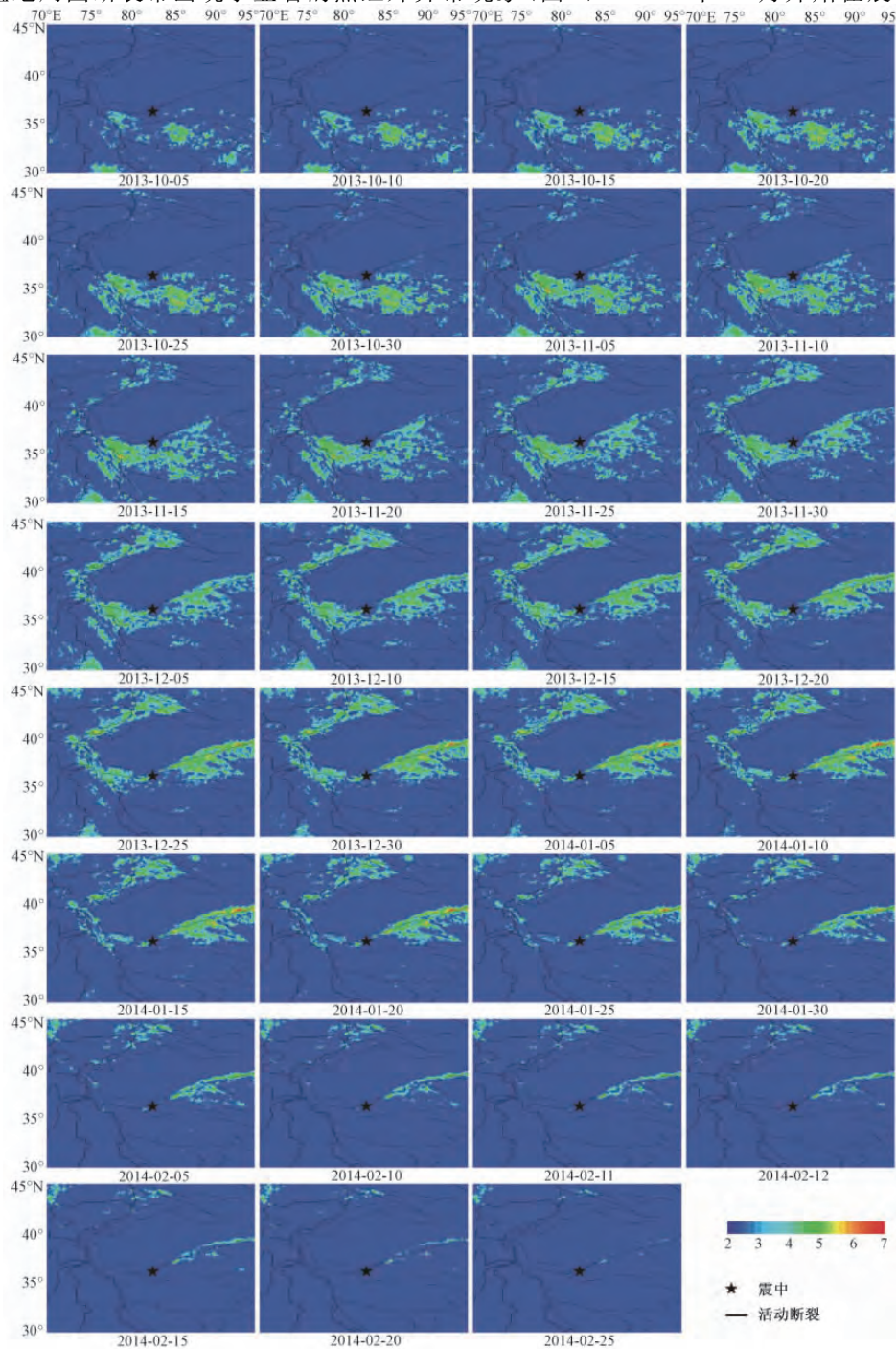


图3 2014年2月12日于田地震前亮温小波相对能谱的异常时空演化

的西昆仑东段地区和邻近的青藏高原区域出现异常,之后异常区域逐渐扩大。从 2013 年 11 月开始塔里木盆地西缘的中天山、南天山区域断裂带出现异常,随后该区域异常空间范

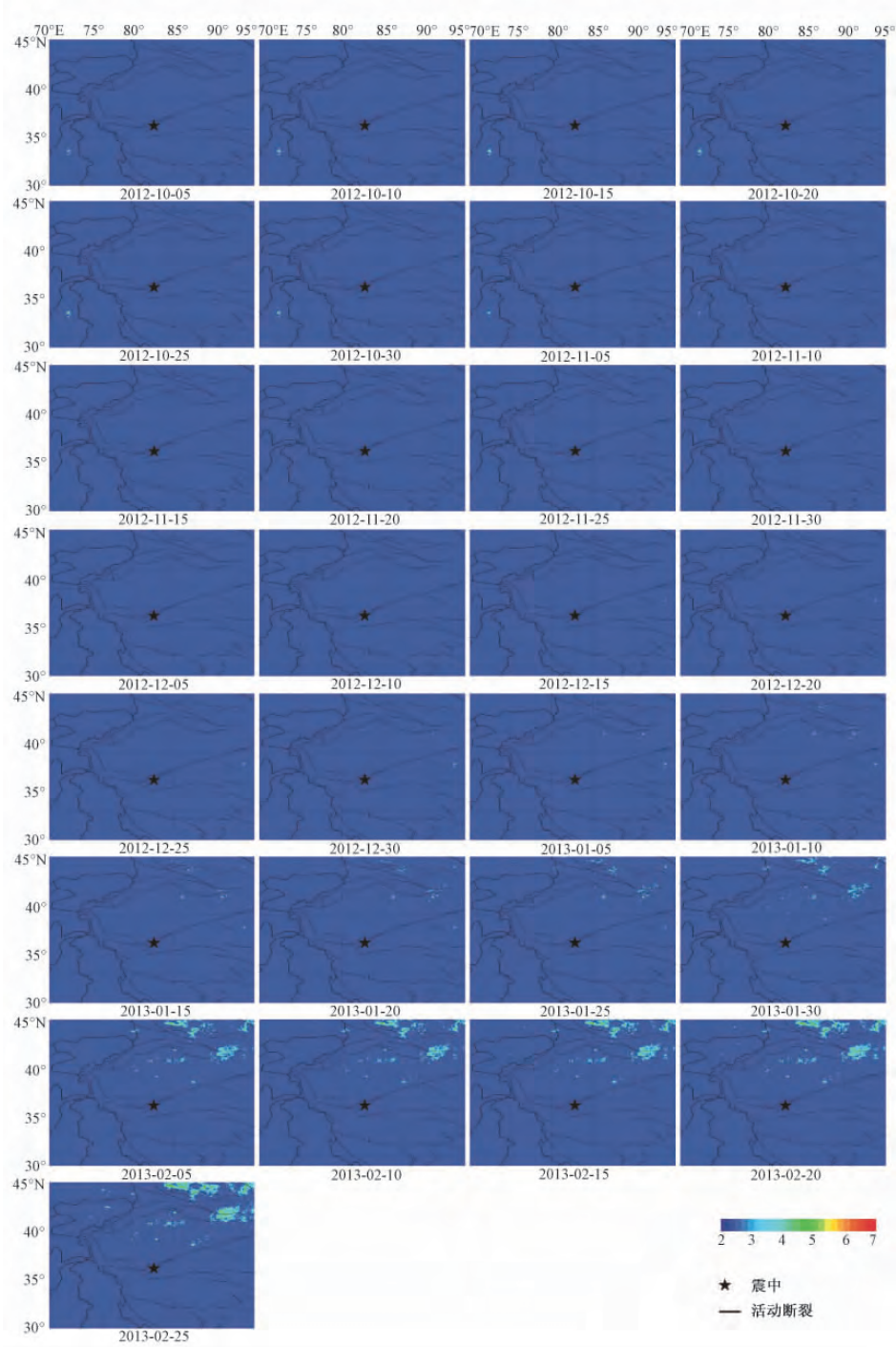


图 4 2012 年 10 月 ~ 2013 年 2 月分析区域亮温小波相对能谱异常时空演化

围持续扩大。与此同时,青藏高原内部异常区域逐渐向阿尔金断裂带移动。从2013年11月下旬开始形成沿塔里木盆地周围中天山-南天山-西昆仑-阿尔金断裂带分布的大范围带状异常区域,随后异常区域范围进一步扩大,小波相对能谱异常幅度进一步增加,12月下旬和2014年1月上旬异常达到峰值。随着地震的临近,异常区域范围开始缩小,异常幅度开始衰减,其中南天山-西昆仑和震中附近异常衰减较快,至地震发生时该区域异常已经消失,但在阿尔金断裂和中天山区域异常仍存在。地震发生后整个区域异常进一步衰减,2014年2月下旬后异常消失。此次异常经历了如下演化过程:正常背景-异常出现-异常区域扩展-异常达极值-异常衰减-异常消失,于田地震发生在震中区域异常消失数天之后。分析区域2012年10月~2013年2月地表亮温资料小波相对能谱演化过程示于图4。由图4可见,塔里木盆地西缘、南缘和东缘的中天山-南天山-西昆仑-阿尔金断裂带未出现2014年2月12日于田地震前类似的异常现象。2012年5月1日~2014年4月30日于田地震震中像元(36.1°N, 82.5°E)小波相对能谱演化过程示于图5。由图5可见,于田地震前的小波相对能谱大于其余时段。如果将小波相对能谱值大于3视为异常,那么在这2年中仅在于田地震前出现过异常,其余时段均未出现异常。

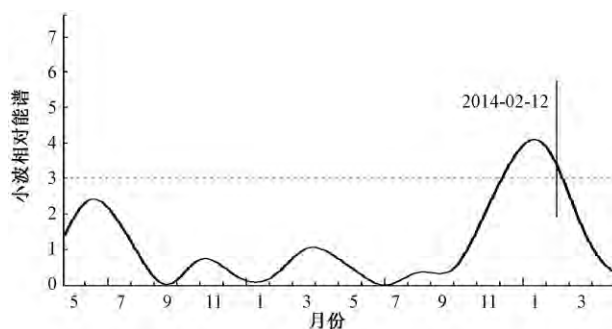


图5 震中像元2012年5月1日~2014年4月30日小波相对能谱演化

4 讨论与结论

地震前震中及邻区地表出现增温异常现象已得到大量观测结果的证实,同时研究也发现长期连续的温度场变化可能反映断层和地壳大型线性构造的活动(屈春燕等,2006c;马瑾等,2006;陈顺云等,2006;强祖基等,2009;Carreno et al,2001)。一次地震的孕育和最终发生是地壳板块或次级地块运动在某些部位引起应力集中,当应力超过岩石承受强度时局部岩层发生错断的结果。在地震发生前,应力已近岩层破裂临界状态,贯通地表的裂隙数量增多,地壳气体溢出,同时由于裂隙增多,加强了地下岩层与地表的热对流,可能是这些因素的共同作用使得地震前热红外异常区域集中在震中附近及邻区并沿着断裂分布的(强祖基等,1991、1992;Tronin,1996、2000)。Cicerone等(2009)在总结地震前热辐射异常现象时指出,存在地热和富含油气的地区震前更容易出现热异常现象。塔里木盆地富含油气,盆地周围断层高度发育,应力的增强有利于地下温度相对较高的气体沿已有或新生裂隙加速溢出并引起地表温度发生变化,可能是这些因素使得于田地震前热异常沿着断裂带分布,同时异常区域在演化过程中并没有扩展到稳定的盆地内部。

本文收集了 2014 年 2 月 12 日于田地震震中周围 $30^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 、 $70^{\circ} \sim 95^{\circ} \text{E}$ 范围内 2012 年 5 月 1 日 ~ 2014 年 4 月 30 日由中国静止气象卫星 FY-2E 观测的亮温资料,应用小波相对能谱方法对亮温资料进行了分析研究。分析结果表明,于田地震前亮温资料的小波相对能谱出现显著异常。异常首先出现在震中附近的西昆仑断裂带和青藏高原区域,之后异常区域逐渐扩大并最终形成沿塔里木盆地周围中天山-南天山-西昆仑-阿尔金断裂带呈带状分布的异常区域。震前异常空间范围开始缩小,异常幅度开始衰减,震中区异常衰减较快,在震前数天已完全消失;地震发生后整个区域异常迅速衰减并于 2 月下旬消失。地震恰发生在异常区域内,因而认为本文讨论的热红外异常可能与于田地震是有关联的。

致谢:热红外亮温资料由中国气象局国家卫星气象中心网站提供,两位匿名审稿专家提出了许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献

- 陈顺云、刘培润、刘力强等,2006,地表热红外辐射的小波分析及其在现今构造活动研究中的意义,地球物理学报,39(3), 824 ~ 830。
- 马瑾、陈顺云、刘培润等,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,地球物理学报,49(3), 816 ~ 823。
- 马晓静、邓志辉、陈梅花等,2009,从卫星红外亮温与大地热流的关系看地震前的热红外异常,地球物理学报,52(11), 2746 ~ 2751。
- 强祖基、孔令昌、王戈平等,1992,地球放气、热红外异常与地震活动,科学通报,24,2259 ~ 2262。
- 强祖基、赁常恭、李玲芝等,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。
- 强祖基、徐秀登、赁常恭,1990,卫星热红外异常——临震前兆,科学通报,35(17), 1324 ~ 1327。
- 强祖基、徐秀登、赁常恭,1991,非增温背景下的热红外异常兼机制讨论,科学通报,36,841 ~ 844。
- 强祖基、姚清林、魏乐军等,2009,从震前卫星热红外图像看中国现今构造应力场特征,地球学报,30(6), 873 ~ 884。
- 屈春燕、马瑾、单新建,2006a,一次卫星热红外地震异常前兆现象的证伪,地球物理学报,49(2), 490 ~ 495。
- 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,地球科学进展,21(7), 699 ~ 705。
- 屈春燕、单新建、马瑾,2006c,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,地震学报,28(1), 91 ~ 97。
- 单新建、李建华、马超,2005,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,地球物理学报,48(2), 321 ~ 326。
- 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。
- Blackett M, Wooster M J, Malamud B D, 2011, Exploring land surface temperature earthquake precursors: A focus on the Gujarat (India) earthquake of 2001, Geophys Res Lett, 38, L15303.
- Carreno E, Capote R, Yague A, et al, 2001, Observations of thermal anomaly associated to seismic activity from remote sensing, General Assembly of European Seismology Commission, Portugal, 265 ~ 269.
- Cicerone R D, Ebel J E, Britton J, 2009, A systematic compilation of earthquake precursors, Tectonophysics, 476, 371 ~ 396.
- Farge M, 1992, Wavelet transform and their applications to turbulence, Annu Rev Fluid Mech, 24(1), 395 ~ 458.
- Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, et al, 1988, The earth's outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity, Proc Acad Sci USSR, 301, 67 ~ 69.
- Kumar P, Foufoula E, 1997, Wavelet analysis for geophysical applications, Rev Geophys, 35(4), 385 ~ 412.
- Ouzounov D, Freund F, 2004, Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data, Adv Space Res, 33, 268 ~ 273.
- Torrence C, Compo G P, 1998, A practical guide to wavelet analysis, Bull Amer Meteorol Soc, 79, 61 ~ 78.

- Tronin A A, 1996, Satellite thermal survey—a new tool for the study of seismoactive regions, *Int J Remote Sens*, **17**, 1439 ~ 1455.
- Tronin A A, 2000, Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in China, *Int J Remote Sens*, **21**, 3169 ~ 3177.
- Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A, 2002, Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China, *J Geodyn*, **33**, 519 ~ 534.
- Xie T, Kang C L, Ma W Y, 2013, Thermal infrared brightness temperature anomalies associated with Yushu (China) earthquake on 14 April, *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **13**, 1105 ~ 1111.

Possible thermal brightness temperature anomalies associated with the Yutian, Xinjiang $M_s7.3$ earthquake on February 12, 2014

Xie Tao^{1, 2)} Zheng Xiaodong¹⁾ Kang Chunli²⁾ Lu Jun²⁾ Ma Weiyu²⁾

1) Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract In order to analyze the seismic brightness temperature anomalies associated with the Yutian earthquake which occurred at Yutian County, Xinjiang on February 12, 2014, daily brightness temperature data were collected from Chinese geostationary meteorological satellite FY-2E, for the period from May 1, 2012 to April 30, 2014 and the geographical extent of latitude $30^\circ \sim 45^\circ\text{N}$ and longitude $70^\circ \sim 95^\circ\text{E}$. Continuous wavelet transform method was used to analyze relative wavelet power spectrum (RWPS) of brightness temperature data for each pixel. And the RWPS time-spatial evolution within analysis area was obtained. The results showed that anomaly started at the vicinity of epicentre since October 2013, and anomalous areas gradually enlarged and stretched towards to Altun fault zone and the eastern part of Western Kunlun fault zone. Anomaly began to appear at fault zones at central Tianshan, southern Tianshan and western part of western Kunlun area which located at the western margin of Tarim basin since November 2013. Then anomalous area further enlarged and gathered along fault zones, and eventually developed anomalous belts along fault zones around the Tarim basin. Anomaly area and amplitude reached maximum in late December 2013 and early January 2014. With the impending of earthquake, anomaly area and amplitude dwindled. Anomaly at the vicinity of epicentre disappeared days before the occurrence of the main shock. But anomaly at Altun and central Tianshan areas still lasted. After the main shock, anomaly attenuated quickly and the whole anomaly disappeared in late February 2014.

Key words: Yutian earthquake Brightness temperature Thermal infrared Anomalies
Wavelet transform