

文章编号: 1672-8785(2014)10-0033-08

中国大陆及邻近海域的中强地震热红外异常研究

魏从信^{1,2} 张元生^{1,2 *} 郭 晓^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000;
2. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃兰州 730000)

摘要: 应用中国静止气象卫星 FY-2C/2E 遥感亮温资料, 通过小波变换和计算相对功率谱, 分析提取了中国大陆及邻近海域 14 次中强地震的热红外异常特征。其特征为: (1) 异常具有明显的特征周期。大陆地震的周期主要为 13 天和 64 天, 海域地震的周期都在 32 天以下。震中位置相近的地震具有相同的特征周期; (2) 异常的最大幅度明显且易于识别。幅度都在 8 倍以上, 最高甚至达到 20 倍; (3) 地震多发生在异常区域的内部及其边缘, 异常出现与消失的过渡区域是可能的震中位置; (4) 干旱地区大陆地震的特征周期较长, 潮湿地区的较短; (5) 最大异常出现时间与地震发生时间的关系、异常峰值与震级的关系尚不明确; (6) 对比大陆地震与海域地震, 二者在异常幅度、异常出现时间与地震时间的关系、异常幅度与震级的关系等方面存在相似性, 在特征周期和异常范围方面的表现有所不同。

关键词: 中强地震; 热红外异常; 小波变换; 相对功率谱; 亮温

中图分类号: P3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.10.007

Study of Thermal Infrared Anomalies of Moderately Strong Earthquakes in Mainland and Adjacent Sea of China

WEI Cong-xin^{1,2}, ZHANG Yuan-sheng^{1,2 *}, GUO Xiao^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The thermal infrared anomaly characteristics of 14 moderately strong earthquakes happened in the mainland and adjacent sea of China are extracted and analyzed by wavelet transform and relative power spectrum calculation according to the remote sensing brightness temperature data from geostationary meteorological satellites FY-2C/2E of China. The anomaly characteristics include: (1) Anomalies have obvious characteristic periods. The periods for mainland earthquakes are 13 days and 64 days and those for sea earthquakes are less than 32 days. The earthquakes with similar epicentral positions have the same characteristic periods; (2) Maximum anomaly amplitude is obvious and easy to be identified. Most of the amplitude is more than 8 times, and even up to 20 times; (3) Earthquakes are located in the interior and edges of anomaly regions. The transition areas in which anomalies appear and disappear are possible epicenters; (4) Earthquakes happened in arid areas have longer characteristic periods and those happened in wet areas have shorter characteristic periods; (5) The relationship between maximum ano-

收稿日期: 2014-05-06

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项 (2012IESLZ09)

作者简介: 魏从信 (1984-), 男, 甘肃兰州人, 硕士, 主要从事地震卫星遥感应用研究。

E-mail: weicx12@163.com * 通讯作者: 张元生 E-mail: zhangys@gssb.gov.cn

maly occurring time and earthquake happening time and the relationship between anomaly peak and amplitude are not clear yet; (6) By comparison, mainland earthquakes and sea earthquakes have the similarity in above relationships, but their characteristic periods and anomaly areas are different.

Key words: moderately strong earthquake; thermal infrared anomaly; wavelet transform; relative power spectrum; brightness temperature

0 引言

应用卫星热红外遥感资料研究地震异常始于 20 世纪 80 年代^[1]。随着卫星遥感技术的发展及应用，全球都在积极开展地震的热红外研究。中国多位学者在地震热异常提取方法及异常与构造关系方面都取得不小的进展。强祖基等认为，大地震多发生在增温异常带附近，异常特征与地震带、活动构造带相关^[2-8]。徐秀登等认为，地震前多有可识别的红外临震异常显示，呈现突发特征^[9]。马瑾等研究发现，玛尼地震与阿尔金断裂带活动之间有一定的对应关系^[10]。张元生等应用不同于以前的卫星红外遥感资料处理方法（小波变换 – 相对功率谱法），选用静止卫星的红外遥感亮温资料，对 2008 年的汶川 8.0 级特大地震进行再研究，发现在大地震之前存在明显的特征周期、振幅以及热辐射分布区域特征^[11]。

地震热红外异常信息是复杂背景中的弱信息，识别提取这些信息是地震热红外异常研究的难点。前人主要研究了大地震或强烈地震的热红外异常。研究结果表明，大多数强烈地震在发生前都存在明显的热红外异常，用提取方法可以有效识别这些异常；地震的热红外异常变化与断层活动性有明显的对应关系^[12-21]。由于中强地震大多发生在较小的活动构造（断层）区域，因此热红外异常信息相对更弱^[25,26]。本文应用中国静止气象卫星 FY-2C/2E 的相当黑体辐射亮温（TBB）资料，应用小波变换和相对功率谱处理，提取在中国大陆及邻近海域发生的 14 次中强地震的热红外异常信息，获得该类地震的热红外异常特征。

1 数据资料

选用中国静止气象卫星风云系列的相当黑体辐射（TBB）数据，是因为静止卫星数据具有

时间一致性和地点可比性等优点。资料起止时间为 2006 年 4 月 1 日到 2011 年 12 月 31 日，其中 2009 年 11 月 25 日至 2011 年 12 月 31 日选用 FY-2E 卫星的数据（FY-2E 为 FY-2C 的替代星）。FY-2C 卫星于 2004 年发射，FY-2E 卫星于 2008 年发射，它们于 30 min 内对地球约三分之一的面积观测一次，其星下点红外分辨率为 5 km。受制于计算时间和存储等原因，资料范围为 5° ~ 50°N 和 55° ~ 150°E。为减少太阳辐射的影响，选取午夜的观测数据，数据时间段为世界时（GMT）17:00、18:00、19:00、20:00 和 21:00。用补窗法对这几次数据进行简单处理，以去除部分云影响，再计算其平均值，构成日值。

2 热红外异常信息的提取方法

利用小波变换^[11]对多年的卫星热红外日值数据进行处理，分离出基本温度场（直流部分）、年变温度场和由其他因素引起的变化温度场。对每个像元而言，经小波变换处理后的数据在时间域是相对变化的正负相间的热红外波形数据。应用功率谱法可以获得优势频率和幅值。为了对比研究地震发生前后热红外变化的功率谱与其他时段的功率谱有何不同，对每一像元的所有频率功率谱作相对幅值处理，生成功率谱的时频相对变化空间数据^[22-24]。通过计算得到时频空间数据，利用时频剖面图法进行全时空和全频段扫描，识别提取地震的热红外异常信息。

数据计算及异常提取的具体步骤为：(1) 对原始的卫星亮温数据进行小波变换，在时间域扣除年变和高频部分；(2) 取窗长 n=64 天和滑动窗长 m=1 天，通过傅氏变换计算其功率谱。对每个像元的时程数据滑动一次，获得一组功率谱，时间约定为窗内数据的起始时间，这样就获得了时频空间数据；(3) 对变换后的数据做相

对处理, 即每一像元的数值除以该像元的年平均值, 例如像元点为 30°N 和 100°E, 时间为 2010 年 01 月 01 日的功率谱数据除以该像元的年平均值, 就获得该点的相对功率谱值; (4) 通过异常时空演化图和区域时间序列曲线提取异常幅度大于 5 倍且持续时间大于 20 天的异常。

3 震例分析

参照中国地震信息网 (<http://www.csi.ac.cn>) , 选取 2008~2010 年期间中国大陆及邻近海域的 14 次 6.5~6.9 级中强地震作为研究对象 (表 1)。这些地震的特征周期分别为 64 天 /6≈11 天、 64 天 /5≈13 天、 64 天 /4=16 天、 64 天 /3≈21 天、 64 天 /2=32 天和 64 天 /1=64 天, 对所有功率谱特征周期相对谱文件进行平面图像扫描, 提取地震的热红外异常信息 (见图 1~3)。

3.1 异常演化现象分析

图 1(b) 为 2008 年 8 月 25 日西藏仲巴县 6.8 级地震的异常特征。从图 1(b11) 可见, 异常演化表现为出现 – 最大 – 消失的过程。6 月 22 日异常出现, 异常幅值开始增大, 7 月 12 日达到最大, 如图 1(b12) 所示, 最大异常幅度约 15 倍, 9 月 25 日消失。震中附近区域近 6 年出现 1 次持续时间约为 3 个月的热异常, 说明该热红外异常不是由偶然的天气变化所致, 而是由地震引起的。

3.2 最大异常出现时间与地震发生时间的关系

最大异常出现时间呈现 3 种情况: 震前、震时和震后。震前出现异常的地震有 4 个大陆地震和 1 个海域地震, 如图 1(b)、图 1(c)、图 1(d)、图 1(e) 和图 2(e) 所示, 分别比发震时间早约 40 天、35 天、5 天、30 天和 30 天。最大幅度异常出现在发震时刻的有 4 个海域地震, 如图 2(b)、图 2(c)、图 3(a) 和图 3(c) 所示。异常出现在震后的有 1 个大陆地震和 4 个海域地震, 分别比发震时间晚约 35 天、10 天、10 天、25 天和 30 天, 如图 1(a)、图 2(a)、图 2(e)、图 3(b) 和图 3(d) 所示。在大陆地震的 5 个震例中, 有 4 个在震前出

现异常, 比例达到 80%, 这对预测地震有一定的帮助作用。但海域地震的规律性不强。

3.3 异常峰值大小与地震震级的关系

热异常的最大幅值约为 8~20 倍, 近 6 年时间出现大幅值长时间异常的次数不多于 3 次。各大陆地震震例的最大幅度分别为 8 倍、15 倍、9 倍、17 倍和 13 倍。如图 1 所示, 异常次数分别为 2 次、1 次、3 次、1 次和 1 次。图 2 中, 海域地震震例的异常最大幅度分别为 15 倍、20 倍、11 倍、8 倍和 15 倍, 次数分别为 1 次、1 次、1 次、2 次和 2 次; 图 3 中各个海域震例分异常的最大幅度分别为 8 倍、9 倍、9 倍和 17 倍, 次数分别为 1 次、1 次、3 次和 1 次。这些数据表明, 该震级范围内异常幅值与震级无明显相关性。

3.4 异常范围与地震震中的关系

全部地震的热红外异常都集中在震中附近区域。大陆地震的异常范围较小, 演化规律性较强。如图 1 所示的 5 个震例, 地震 a 的异常活动在震中北部, 地震 b 的异常活动在震中四周, 地震 c 的异常活动在震中南部, 地震 d 的异常活动在震中四周, 地震 e 的异常活动在震中西北部。海域地震的异常范围较大, 区域较分散。

3.5 大陆地震与海域地震热红外异常的同异分析

大陆地震的特征周期分别为 64 天、13 天、11 天、64 天和 13 天, 异常幅度在 8~17 倍之间, 异常区域集中, 且离震中很近, 如图 1 所示。图 2 中, 海域地震的特征周期分别为 16 天、32 天、32 天、16 天和 21 天; 图 3 中, 特征周期分别为 21 天、32 天、21 天和 21 天, 主要特征周期是 16 天、21 天和 32 天, 异常幅度为 8~20 倍。陆地地震与海域地震在异常幅度和异常出现时间方面存在相似性, 在特征周期和异常范围方面表现有所不同, 表现为: 大陆地震的特征周期主要为 13 天和 64 天, 海域地震的特征周期是 16 天、21 天和 32 天; 大陆地震的异常范围较小, 演化的规律性较强; 海域地震的异常范围较大, 区域较分散。

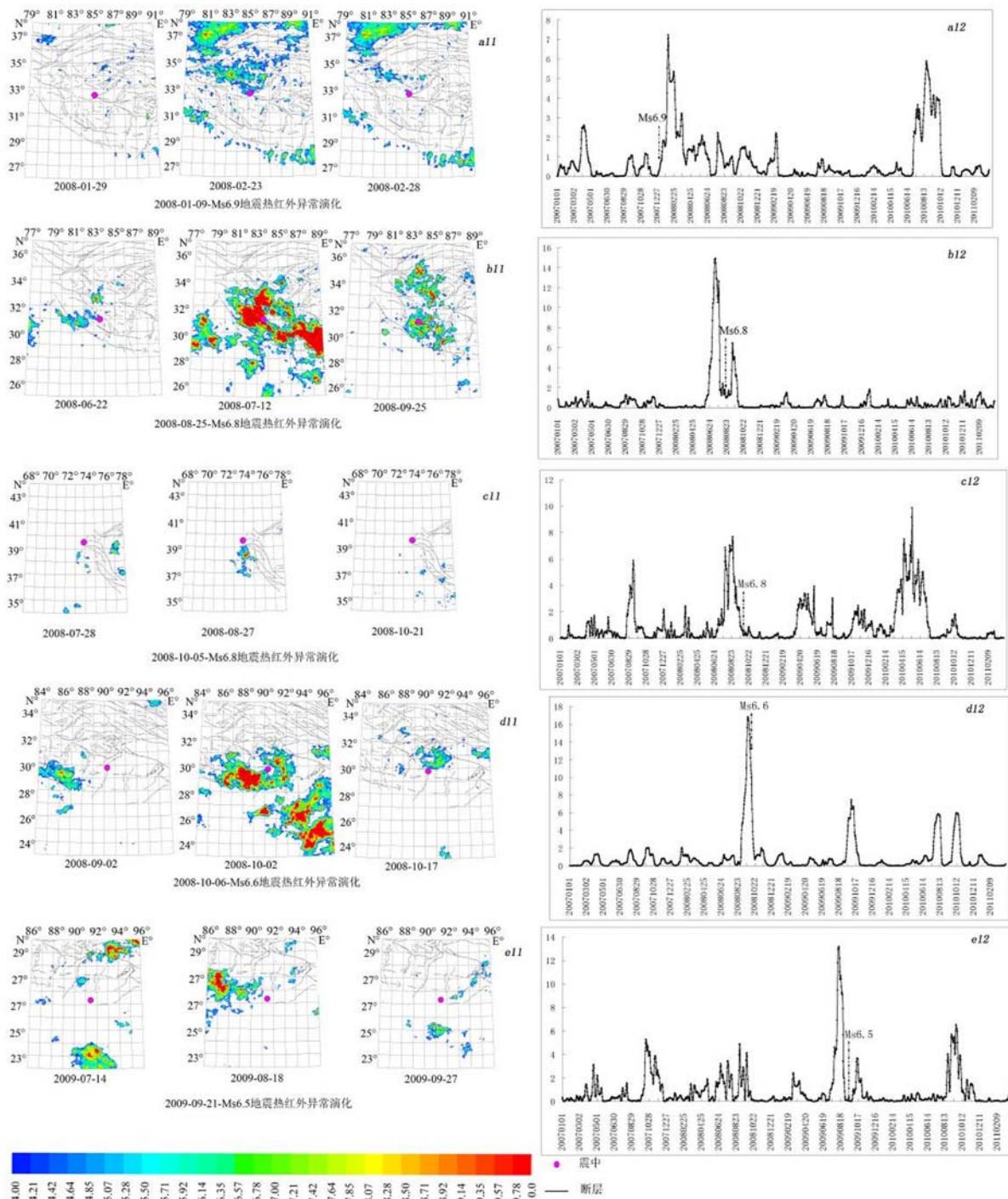


图 1 大陆地震亮温相对功率谱异常时空演化 (a12 为 2008 年 1 月 9 日 Ms6.9 地震热红外时序曲线, 区域为: $32.50^{\circ} \sim 33.00^{\circ}$ N、 $85.00^{\circ} \sim 85.50^{\circ}$ E; b12 为 2008 年 8 月 25 日 Ms6.8 地震热红外时序曲线, 区域为: $31.00^{\circ} \sim 31.50^{\circ}$ N、 $82.00^{\circ} \sim 82.50^{\circ}$ E; c12 为 2008 年 10 月 5 日 Ms6.8 地震热红外时序曲线, 区域为: $38.00^{\circ} \sim 38.50^{\circ}$ N、 $74.00^{\circ} \sim 74.50^{\circ}$ E; d12 为 2008 年 10 月 6 日 Ms6.6 地震热红外时序曲线, 区域为: $29.00^{\circ} \sim 29.50^{\circ}$ N、 $88.00^{\circ} \sim 88.50^{\circ}$ E; e12 为 2009 年 9 月 21 日 Ms6.5 地震热红外时序曲线, 区域为: $28.00^{\circ} \sim 28.50^{\circ}$ N、 $87.00^{\circ} \sim 87.50^{\circ}$ E)

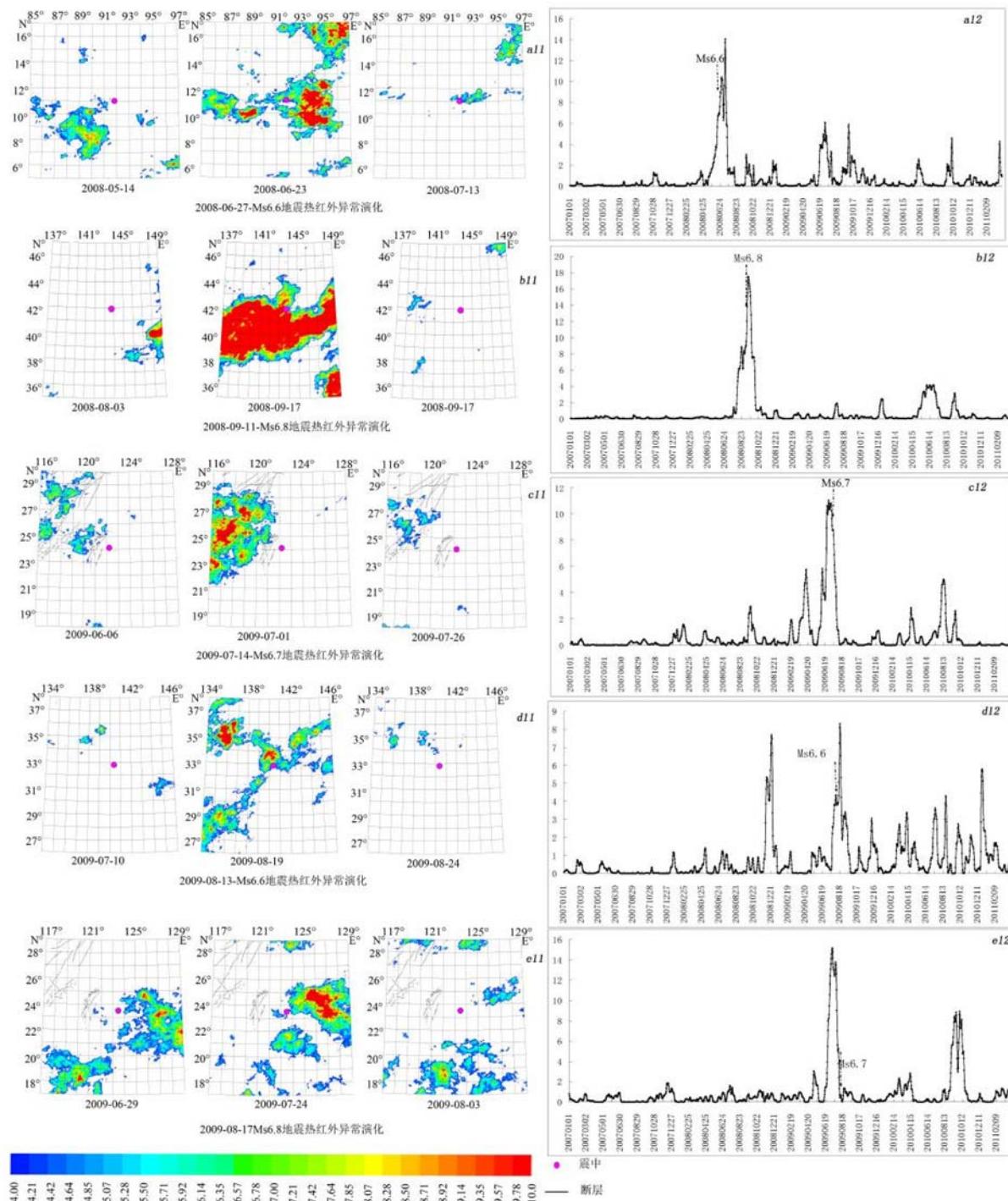


图 2 海域地震亮温相对功率谱异常时空演化 (a12 为 2008 年 6 月 27 日 Ms6.6 地震热红外时序曲线, 区域为: $9.00^{\circ} \sim 9.50^{\circ}\text{N}$ 、 $96.50^{\circ} \sim 97.00^{\circ}\text{E}$; b12 为 2008 年 9 月 11 日 Ms6.8 地震热红外时序曲线, 区域为: $39.50^{\circ} \sim 40.00^{\circ}\text{N}$ 、 $141.00^{\circ} \sim 141.50^{\circ}\text{E}$; c12 为 2009 年 7 月 14 日 Ms6.7 地震热红外时序曲线, 区域为: $25.00^{\circ} \sim 25.50^{\circ}\text{N}$ 、 $117.50^{\circ} \sim 118.00^{\circ}\text{E}$; d12 为 2009 年 8 月 13 日 Ms6.6 地震热红外时序曲线, 区域为: $33.50^{\circ} \sim 34.00^{\circ}\text{N}$ 、 $139.50^{\circ} \sim 140.00^{\circ}\text{E}$; e12 为 2009 年 8 月 17 日 Ms6.8 地震热红外时序曲线, 区域为: $24.50^{\circ} \sim 25.00^{\circ}\text{N}$ 、 $125.50^{\circ} \sim 126.00^{\circ}\text{E}$)

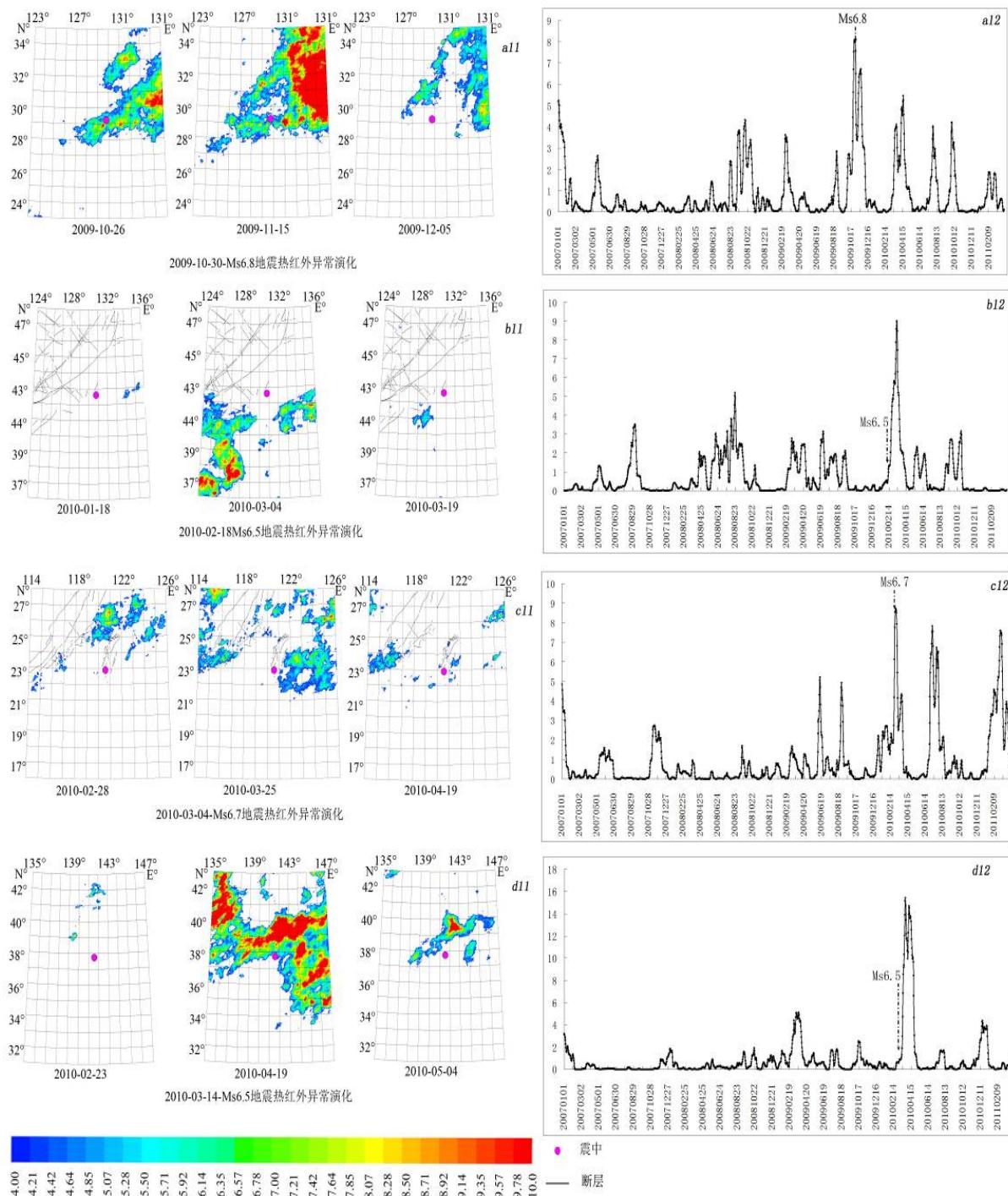


图 3 大陆地震亮温相对功率谱异常时空演化海域地震亮温相对功率谱异常时空演化 (a12 为 2009 年 10 月 30 日 Ms6.7 地震热红外时序曲线, 区域为: $28.50^{\circ} \sim 29.00^{\circ}\text{N}$ 、 $129.00^{\circ} \sim 129.50^{\circ}\text{E}$; b12 为 2010 年 2 月 18 日 Ms6.5 地震热红外时序曲线, 区域为: $40.50^{\circ} \sim 41.00^{\circ}\text{N}$ 、 $128.50^{\circ} \sim 129.00^{\circ}\text{E}$; c12 为 2010 年 3 月 4 日 Ms6.7 地震热红外时序曲线, 区域为: $26.00^{\circ} \sim 26.50^{\circ}\text{N}$ 、 $120.50^{\circ} \sim 121.00^{\circ}\text{E}$; d12 为 2010 年 3 月 14 日 Ms6.5 地震热红外时序曲线, 区域为: $40.00^{\circ} \sim 40.50^{\circ}\text{N}$ 、 $137.00^{\circ} \sim 137.50^{\circ}\text{E}$)

地震参数和地震的热红外异常现象的总结见表 1, 其中有大陆地震 5 个, 海域地震 9 个。总体来讲, 该系列的地震热红外异常幅度都在 8 倍以上, 异常特征周期变化多样。周期在 32 天以下的有 12 个地震, 其中海域地震都在 32 天以下。特征周期为 64 天的两次大陆地震的地理位置接近, 特征周期为 13 天的两次大陆地震的地

理位置接近。特征周期为 16 天的海域地震的地震次数为 2 次; 特征周期为 21 天的海域地震的地震次数为 4 次, 地理位置靠近北纬 $20\sim30^\circ$ 、东经 $120\sim130^\circ$; 特征周期为 32 天的海域地震的地震次数为 4 次, 地理位置靠近北纬 40° 左右、东经 $130\sim140^\circ$ 。

表 1 地震参数及热红外异常现象总结

发震日期	纬度 ($^{\circ}$ N)	经度 ($^{\circ}$ E)	震级 (Ms)	深度 (km)	特征周期 (Day)	异常幅度 Rate	备注
20080109	32.50	85.20	6.9	33	64	8	大陆地震
20080627	11.01	91.82	6.6	17	16	15	海域地震
20080825	31.00	83.60	6.8	14	13	15	大陆地震
20080911	41.89	143.75	6.8	25	32	20	海域地震
20081005	39.50	73.90	6.8	33	11	12	大陆地震
20081006	29.80	90.30	6.6	8	64	17	大陆地震
20090714	24.10	122.20	6.7	14	32	11	海域地震
20090813	32.82	140.40	6.6	53	16	8	海域地震
20090817	23.50	123.50	6.7	20	21	15	海域地震
20090921	27.33	91.44	6.5	14	13	13	大陆地震
20091030	29.22	129.78	6.8	34	21	8	海域地震
20100218	42.60	130.80	6.5	33	32	10	海域地震
20100304	22.90	120.60	6.7	14	21	10	海域地震
20100314	37.74	141.59	6.5	32	21	13	海域地震

地震的红外异常现象主要表现为: (1) 异常的总体特征表现为出现 – 最大 – 消失三个阶段, 13 次地震均在震前 5~65 天开始出现异常, 7 次地震在震前 5~40 天出现最大范围最大幅度的异常, 7 次地震在震后 5~30 天出现最大范围最大幅度的异常。在震后 5~50 天, 全部地震的异常逐渐消失; (2) 全部地震的热红外异常都集中在出现在震中附近区域; (3) 不同地震具有不同的特征周期。地震热红外时序曲线表明, 震中附近区域在近 6 年中出现了 3 次以下的热红外异常现象。其中, 在 6 年里出现 1 次异常的震中有 9 个, 出现 2 次异常的震中有 3 个, 出现 3 次异常的震中有 2 个。异常幅度一般都在 8 倍以上, 最大达 20 倍左右。

4 结论

应用小波变换 – 相对功率谱法分析提取了

中国大陆及邻近海域 14 次中强地震 (Ms6.5~6.9) 的热红外异常特征。特征总体表现为: (1) 热异常具有明显的特征周期, 其中大陆地震的周期为 13 天和 64 天, 海域地震的周期为 16 天、21 天和 32 天。位置接近的地震具有相同的特征周期。(2) 热异常的最大幅度在 8~20 倍之间, 本文所研究震例的异常幅度与震级无明显的对应关系。

地震热红外异常与震中的关系表明, 地震多发生在异常区域内部及其边缘, 震中位置多位于异常出现及消失的过渡区域。

最大异常出现时间与地震发生时间的关系、异常峰值与震级的关系尚不明确。另外, 比较大陆地震与海域地震, 两者在异常幅度、异常出现时间与地震发生时间的关系、异常幅度与震级的关系等方面存在相似性, 但在特征周期和异常范围方面的表现有所不同。

致 谢

部分静止卫星数据资料由中国气象局国家卫星气象中心提供。

参 考 文 献

- [1] Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, et al. The Earth Outgoing IR Radiation as an Indicator of Seismic Activity [J].*Proc Acad Sci USSR*, 1988, **30**(1): 67–69.
- [2] 强祖基, 徐秀登, 贲常恭. 卫星热红外异常—临震前兆 [J].*科学通报*, 1990(17):1324–1327.
- [3] Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. Impending-earthquake Satellite Thermal Infrared and Ground Temperature Increase Anomalies[J].*Chinese Science Bulletin*, 1991, **36**(22): 1894–1900.
- [4] Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. Thermal Infrared Anomaly Precursor of Impending Earthquakes[J].*Chinese Science Bulletin*, 1991, **36**(4): 319–323.
- [5] 强祖基, 贲常恭. 卫星热红外图像亮温异常—短临震兆 [J].*中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, **28**(6): 564–573.
- [6] Qiang Z J, Dian C G, Li L Z, et al. Satellitic Thermal Infrared Brightness Temperature Anomaly I mage–short-term and Impending Earthquake Precursors[J].*Sci China Ser D–Earth*, 1999, **42**: 313–324.
- [7] Qiang Z J, Kong L C, Guo M H, et al. An Experimental Study on Temperature Increasing Mechanism of Satellitic Thermo-infrared[J].*Acta Seismol Sin*, 1997, **10**(2): 247–252.
- [8] Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. Thermal Infrared Anomalies under the Non-temperature-increment Background and the Mechanism Discussion[J].*Chinese Science Bulletin*, 1991, **36**(22): 1901–1906.
- [9] Xu X D, Xu X M, Ma S D, et al. Preliminary Inquiry into the Causes of Anomaly Increase of Air Temperature by an Impending Earthquake[J].*Acta Seismol Sin*, 1995, **8**(1): 149–154.
- [10] 马瑾, 陈顺云, 刘培洵, 等. 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*, 2006, **49**(3): 816–823.
- [11] Zhang Y S, Guo X , Zhong M J, et al. Wenchuan Earthquake: Brightness Temperature Changes from Satellite Infrared Information[J].*Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(3):1–8
- [12] Tronin A A. Satellite Thermal Survey-a New Tool for the Study of Seismoactive Regions[J].*International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(8): 1439–1455.
- [13] Tronin A A. Satellite Thermal Survey Application for Earthquake Prediction. In: Hayakawa M. Ed. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes[J].Tokyo: Terapub, 1999, 717–746.
- [14] Tronin A A. Thermal IR Satellite Sensor Data Application for Earthquake Research in China[J].*International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**: 3169–3177.
- [15] Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A. Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Japan and China[J].*Journal of Geodynamics*, 2002, **33**: 519–534.
- [16] Saraf A K, Choudhury S. Satellite Detects Surface Thermal Anomalies Associated with the Algerian Earthquakes of May, 2003[J].*International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**: 2705–2713.
- [17] Saraf A K, Choudhury S. NOAA–AVHRR Detects Thermal Anomaly Associated with the 26 January 2001 Bhuj Earthquake, Gujarat, India[J].*International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(6): 1065–1073.
- [18] Wang Q L, Wang W P, Liang W F, et al. Stress-dissipative Heat Geotemperature Precursor Mechanism of Earthquakes[J].*Acta Seismologica Sinica*, 1998, **11**(5): 615–621.
- [19] 张元生, 沈文荣, 徐辉. 新青 8.1 级地震前卫星热红外异常 [J].*西北地震学报*, 2002, **24**(1): 1–4.
- [20] 张元生, 郭晓, 张小美, 等. 应用静止卫星热红外遥感亮温资料反演地表温度的方法研究 [J].*西北地震学报*, 2004, **26**(2): 113–117.
- [21] 卢振权, 吴必豪, 强祖基, 等. 中国近海海域卫星热红外亮温增温异常探讨 [J].*现代地质*, 2005, **19**(1): 74–82.
- [22] 郭晓, 张元生, 钟美娇, 等. 提取地震热异常信息的功率谱相对变化率法及震例分析 [J].*地球物理学报*, 2010, **53**(11):2688–2695.
- [23] 魏从信, 张元生, 惠少兴. 2009 年 8 月 11 日安达曼群岛 Ms7.5 级地震热红外变化 [J].*地震研究*, 2011, **34**(2):41–45.
- [24] 张元生, 郭晓, 魏从信, 等. 日本 9 级和缅甸 7.2 级地震热红外表现特征 [J].*地球物理学报*, 2011, **54**(10):2575–2580.
- [25] 张璇, 张元生, 魏从信, 等. 云南彝良 5.7 级地震前卫星热红外异常 [J].*地震工程学报*, 2013, **35**(1):171–176.
- [26] 张璇, 张元生, 魏从信, 等. 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*, 2013, **35**(2):272–277.