

魏从信, 张元生, 王莹. 2018. 日本 M_w 9.1 地震对区域热辐射背景场影响的时频分析. 地震学报, 40(2): 205–214. doi: 10.11939/jass.20170081.

Wei C X, Zhang Y S, Wang Y. 2018. Time-frequency analysis of the influence of Japan M_w 9.1 earthquake on regional thermal radiation background field. Acta Seismologica Sinica, 40(2): 205–214. doi: 10.11939/jass.20170081.

日本 M_w 9.1 地震对区域热辐射背景场影响的时频分析*

魏从信^{1,2)} 张元生^{1,2),†} 王莹¹⁾

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国兰州 730000 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地

摘要 一次特大地震会对震中及附近区域热辐射背景场造成较大影响. 应用中国静止气象卫星风云二号系列(FY-2C/2E/2F/2G)的亮温资料, 通过时频相对功率谱法对 2007—2016 年(30°N—45°N, 135°E—150°E)范围的时频数据进行全时空全频段扫描, 得到了 2011 年 3 月 11 日日本 M_w 9.1 特大地震的热辐射异常, 该异常特征明显且与地震发震构造对应较好. 应用时频分析方法分析 M_w 9.1 地震对上述扫描区域热辐射背景场的影响, 得出 2011 年的热辐射异常出现时间长、范围大且与其它年份不同, 进而得到影响过程的 3 个阶段(出现—最大—消失). 同时对多尺度相对功率谱处理地震热辐射异常的异同和优缺点进行了对比研究, 结果显示 6 阶小波变换尺度部分经不同窗长的相对傅里叶功率谱处理能更加有效地识别和提取地震热辐射异常信息, 研究区域 10 年间共出现 6 次热辐射异常, 其中两次与 2011 年地震对应, 3 次与该区域其它地震对应, 仅 1 次无地震对应.

关键词 热辐射 日本 M_w 9.1 地震 时空异常 地球静止气象卫星 时频分析
doi: 10.11939/jass.20170081 中图分类号: P315.72 文献标识码: A

Time-frequency analysis of the influence of Japan M_w 9.1 earthquake on regional thermal radiation background field

Wei Congxin^{1,2)} Zhang Yuansheng^{1,2),†} Wang Ying¹⁾

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou Base of Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

Abstract: A major earthquake has a greater impact on the thermal radiation background field in and around the epicenter. The black body temperature (TBB) data in the region of (30°N—45°N, 135°E—150°E) from 2007 to 2016 which is from the Chinese stationary weather satellite series (FY-2C/2E/2F/2G) was processed using time-frequency relative power spectrum (T-F RPS for short) with full-time and full-band, and we got the thermal radiation anomalies. The result shows that the characteristics of thermal radiation anomalies are obvious and well corresponding to the seismogenic structure of the Japan M_w 9.1 earthquake on March 11, 2011. In

* 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2015IESLZ02)资助.

收稿日期 2017-03-17 收到初稿, 2017-11-30 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: zhangys2011@163.com



addition, we used the time-frequency analysis method to analyze the influence of the $M_w 9.1$ earthquake on the thermal radiation background in the above region. It was found that a long-term thermal radiation anomaly in the region in 2011, which was inconsistent with other years, displayed as three phases from appearance to maximum and then to disappearance. Meanwhile, we compared the similarities and differences of seismic thermal radiation anomalies processed by multi-scale relative power spectrum. It is indicated that the relative Fourier power spectrum with the 6th-order wavelet transform is more effectively with different window lengths to extract and recognize the thermal radiation anomalies. A total of six thermal radiation anomalies occurred in ten years, among which twice occurred in 2011 and three anomalies corresponded to the earthquakes in other years of this area, and the remaining one anomaly had no earthquake to correspond to.

Key words: thermal radiation; Japan $M_w 9.1$ earthquake; spatio-temporal anomaly; geostationary meteorological satellite; time-frequency analysis

引言

地震热辐射异常信息是一种被淹没在复杂背景中的弱信息, 对此类信息的识别提取是研究地震热辐射的难点. 前人的研究主要针对大地震或强烈地震的热辐射异常, 认为许多强震前存在热红外前兆信息(Gorny *et al.*, 1988; 强祖基等, 1990, 1998; Qiang *et al.*, 1991a, b, c, 1997; 卢振权等, 2005; 马瑾等, 2006), 并可利用现有的提取方法有效地被提取识别(Xu *et al.*, 1995; 强祖基等, 1998; 王涛等, 2013). 时频相对功率谱法(time-frequency relative power spectrum, 简称为 T-F RPS)能够很好地提取和识别地震热辐射异常(郭晓等, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2013), 通过分析研究大量震例, 研究人员得到了比较明显的异常结果(张元生等, 2002, 2004, 2011; 魏从信等, 2011, 2013, 2014; 郭晓等, 2013, 2014; 张璇等, 2013a, b).

一次特大地震往往会将对区域热辐射背景场造成很大影响, 本文尝试研究了 2011 年 3 月 11 日日本 $M_w 9.1$ 特大地震对震中及附近海域热辐射背景的影响. 应用我国自主研发的中国静止气象卫星风云二号系列(FY-2C/2E/2F/2G)的亮温(temperature of black body, 简称为 TBB)资料, 通过小波变换和相对功率谱处理, 分析提取 2011 年 3 月 11 日日本 $M_w 9.1$ 特大地震的热辐射异常信息, 研究该地震的热辐射异常特征. 利用时频分析方法研究 10 年(2007—2016 年)间震中及附近区域(30°N — 45°N , 135°E — 150°E)的热辐射背景场, 对比研究不同小波变换尺度因子和不同窗长下的相对功率谱处理得到的地震热辐射异常.

北美板块、太平洋板块、菲律宾海板块和欧亚板块的俯冲活动均会对日本、我国台湾及周边地区的构造背景产生影响. 各大板块的俯冲挤压作用和板间滑动在此次特大地震震区产生了丰富的地震活动性: 1958 年 Etorofu $M_w 8.4$ 地震、1963 年 Kuril $M_w 8.6$ 地震、2003 年 Tokachi-Oki $M_w 8.3$ 地震和 2011 年 Tohoku $M_w 9.0$ 地震是板间地震活动性造成的; 而 1933 年 Sanriku-Oki $M_w 8.4$ 地震和 1994 年 Shikotan $M_w 8.3$ 地震是太平洋板块和北美板块的岩石圈内部变形引起的板内地震活动(USGS, 2013).

2011 年 3 月 11 日日本本州东海岸近海发生的 $M_w 9.1$ 地震使本州以东 400 km 的俯冲带板块边界形成破裂带, 其产生的海啸导致 2 万多人死亡, 造成了毁灭性的人员伤亡和惨重的财产损失. 2007 年 1 月至 2016 年 12 月, 在(30°N — 45°N , 135°E — 150°E)区域内共发生 8 次 $M_w > 7.0$ 强震, 其中 2011 年 5 次, 2009, 2012 和 2013 年各 1 次, 具体信息列于表 1. 从表中可以看出,

表 1 2007 年 1 月至 2016 年 12 月研究区 $M_W>7.0$ 地震参数

Table 1 Parameters of $M_W>7.0$ earthquakes in the studied area from January 2007 to December 2016

发震时刻 年-月-日	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$	震源深度/km	M_W
2009-08-09	137.94	33.17	292	7.1
2011-03-09	142.84	38.44	32	7.3
2011-03-11	142.37	38.30	29	9.1
2011-03-11	141.11	36.28	43	7.9
2011-03-11	144.59	38.06	19	7.7
2011-04-07	141.59	38.28	42	7.1
2012-12-07	143.95	37.89	31	7.3
2013-10-25	144.66	37.16	35	7.1

注: 数据引自 USGS 地震目录 (USGS, 2013).

2011 年 3 月 11 日 $M_W9.1$ 地震符合前震-主震-余震型特征, 2011 年 3 月 9 日的 $M_W7.3$ 地震为前震, 3 月 11 日的 $M_W9.1$ 地震为主震, 同一日的 $M_W7.9$ 地震、 $M_W7.7$ 地震和 4 月 7 日的 $M_W\geq7.1$ 地震为强余震.

1 数据与方法

1.1 数据资料

我国自主研制的中国静止气象卫星风云二号系列(FY-2C/2E/2F/2G), 其观测记录的 TBB 具有面结构数据特征, 即时间可比性和空间一致性, 在大地震热辐射异常识别和研究方面具有时空优势. 其系列卫星包括: C 星(FY-2C), 于 2004 年 10 月 19 日发射, 卫星定点于 105°E 赤道上空, 主要有效载荷为红外和可见光自旋扫描辐射器 VISSR; E 星(FY-2E), 于 2008 年 12 月 23 日发射, 定位于 105°E 赤道上空; F 星(FY-2F), 于 2012 年 1 月 11 日发射; FY-2G 为风云二号(03 批)卫星中的第二颗卫星, 于 2014 年 12 月 31 日发射, 自 2015 年 7 月 1 日开始定位于 105°E 赤道上空, 并提供观测服务.

研究数据源于中国静止气象卫星风云系列的 TBB 遥感数据, 资料起止时间范围为 2007 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日, 空间范围为(30°N — 45°N , 135°E — 150°E). 为减少太阳辐射的影响, 只选取每天午夜的观测数据, 数据时段为世界时(GMT) 17:00, 18:00, 19:00, 20:00, 21:00. 采用补窗法对每日这几个时刻的数据进行简单处理, 去除部分云影响, 并计算其平均值, 构成日值(Zhang *et al.*, 2010).

1.2 时频分析方法

时频分析即时频联合域分析(joint time-frequency analysis, 简称为 JTFA), 其作为分析时变非平稳信号的有力工具, 已成为现代信号处理研究的一个热点(庞锐等, 2013; 王涛等, 2013; 张猛刚等, 2013; 刘海燕等, 2015). 时频分析方法提供了时间域和频率域的联合分布信息, 清楚地描述了信号频率随时间变化的关系, 其基本思想是: 设计时间和频率的联合函数, 使其可同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度. 时间和频率的这种联合函数简称为时频分布. 利用时频分布来分析输入信号, 能给出各个时刻的瞬时频率及其幅值, 并且能够进行时频滤波和时变信号等的研究.

利用小波变换对卫星热辐射多年日值数据进行处理, 以分离出基本温度场(直流部分)、年变温度场和其它因素引起的变化温度场. 经过分析认为 Daubechies 基函数的小波变换 6 阶

尺度较 7 阶尺度部分更好地反映了背景场信息. 分别计算分离 6 阶和 7 阶尺度背景场, 经 2 阶尺度和 7 阶尺度滤波处理后的数据在时间域里是正负相间的波形数据. 应用功率谱法可以在时间域获得优势频率和幅值的时频信息, 即时频分析方法. 通过对近十几年的 TBB 日值数据的分析, 小波变换的 7 阶尺度和 2 阶尺度带通滤波可很好地去除短时气候变化和年变部分信息. 由于计算量的关系, 我们对前文中正负相间的滤波结果作 64 天窗长的相对功率谱计算. 为了对比研究地震前后热辐射变化的功率谱与其它时段的功率谱的差异, 我们对每一像元的所有频率的功率谱作相对幅值处理, 生成功率谱时频相对时空数据. 通过计算得到时频时空数据, 并利用时频剖面图法进行全时空、全频段扫描, 识别提取地震热辐射异常.

1.3 热辐射背景场

地球与外太空时刻进行着能量交换, 同时地球系统保持着能量平衡, 表明地表亮温存在一个基本场. 研究人员提出了地表亮温及年变基准场的概念, 并基于遥感 20 年的资料, 借用分离窗方法和小波分析方法, 提取了中国地表亮温的年变基准场, 为进一步分析热辐射异常场奠定基础(陈顺云等, 2004). 非构造活动或非地震因素对地表热辐射场(地表亮温)的影响, 对利用卫星热红外遥感探索地震前兆或断层活动有着重要的意义. 地表亮温中, 典型非构造活动或非地震因素成分包括由太阳辐射引起的稳定年周期成分, 与地形、纬度及能量平衡等要素有关的长期稳定成分以及合成年变基准场(陈顺云等, 2009).

1.4 数据处理过程

数据计算及异常提取分为以下 4 步: ① 数据预处理, 截取空间范围(30°N — 45°N , 135°E — 150°E)作为 TBB 原始小时观测数据区域, 数据格式转换为通用数据格式以备后续计算; ② 不同尺度小波变换, 分别计算每个象元 6 阶尺度、7 阶尺度及 2 阶和 7 阶带通滤波数据; ③ 相对功率谱计算, 对每组小波变换后的数据作不同窗长(64, 128, 256 和 512 天)的傅里叶功率谱, 并对结果作相对处理(Zhang *et al.*, 2010), 这样就获得了相对时频时空数据; ④ 异常识别提取, 通过异常时空演化图全时空、全频段扫描提取地震热辐射异常.

2 时频分析热辐射背景场

2.1 日本 $M_w9.1$ 地震热辐射异常演化过程分析

应用时频相对功率谱法小波变换 6 阶尺度部分并进行 512 天窗长的傅里叶相对功率谱估计, 通过 256 天特征周期对 2007—2016 年 10 年间(30°N — 45°N , 135°E — 150°E)空间范围进行全时空时频扫描, 观测到 2011 年 1 月 10 日至 2011 年 4 月 30 日出现了长时间、大范围的热辐射异常(图 1), 其余时间均无长时间、大范围异常, 异常时间段和空间展布形态与 2011 年 3 月 11 日本州东海岸近海 $M_w9.1$ 地震对应良好. 时空演化过程表现为: 异常出现(2011 年 1 月 10 日左右); 异常相对幅值和面积逐步增大且达最大(2011 年 2 月 20 日左右至 3 月 10 日左右), 刚好为地震发生时段; 异常逐渐消失(2011 年 4 月 30 日左右), 可以判定为该地震引起的地震热辐射异常(图 1). 从不同周期(频率)的角度来讲, 应用 T-F RPS 小波变换两个尺度(6 阶尺度部分和 7 阶尺度部分), 并用 4 个不同窗长(64, 128, 256 和 512 天)进行傅里叶相对功率谱估计, 之后对每个窗长的相对功率谱均作 5 个频率(周期)的分解, 得到 40 个时间数据集, 时频扫描发现, 仅当 6 阶尺度小波变换经 512 天窗长的傅里叶相对功率谱处理后, 256 天特征周期的时频数据出现异常, 从海量的数据中仅提取到一个与地震时间相吻合的异常, 可以判定为地震异常.

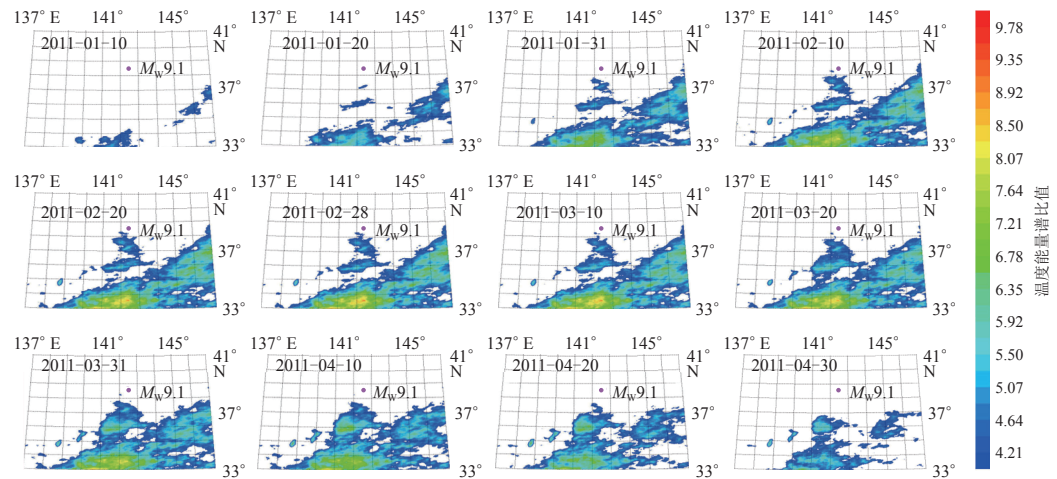


图 1 2011 年 3 月 11 日日本 $M_W9.1$ 地震热辐射异常的时空演化
(小波因子: 6 阶尺度; 傅里叶变换窗长: 512 天; 特征周期: 256 天)

Fig. 1 Spatio-temporal evolution of thermal radiation anomaly caused by the Japan $M_W9.1$ earthquake
(Wavelet factor: 6th order scale; Fourier transform window length: 512 days; characteristic period: 256 days)

2.2 地震引起的热辐射背景场影响分析

应用 T-F RPS 小波变换 2 阶尺度和 7 阶尺度滤波并进行 64 天窗长的傅里叶相对功率谱估计, 去除年变背景场和短周期背景场, 得到由强震引起的背景场, 之后对 2007—2016 年空间范围(30°N—45°N, 135°E—150°E)进行 64 天特征周期的全时空时频扫描, 分析地震引起的热辐射背景场变化. 2011 年 3 月 11 日本日本东海岸近海 $M_W9.1$ 地震对区域热辐射背景场的影响分为 3 个阶段: ① 影响不明显阶段, 震前 2—4 年, 即 2007—2009 年, 通过全时空时频扫描, 未发现该时段出现过长时间、大范围的热辐射异常; ② 主要影响阶段, 震前 1 年和发震年份, 即 2010—2011 年, 通过全时空时频扫描, 得到该时段共出现 4 次长时间、大范围的热辐射异常, 分别为 2010 年 5 月 17 日至 2010 年 7 月 21 日(图 2a), 2011 年 1 月 2 日至 2011 年 3 月 8 日(图 2b), 2011 年 5 月 12 日至 2011 年 8 月 5 日(图 2c)和 2011 年 10 月 4 日至 2011 年 11 月 13 日(图 2d); ③ 影响逐渐减弱阶段, 震后 1 年及以后, 即 2012—2016 年, 通过全时空时频扫描, 得到该时段只在 2013 年 8 月 14 日至 2013 年 10 月 28 日出现过一次长时间、大范围的热辐射异常(图 2e), 该次异常与 2013 年 10 月 25 日 $M_W7.1$ 地震过程相对应(表 2), 说明

表 2 地震热辐射异常对应表

Table 2 Corresponding table of earthquake thermal radiation anomalies

发震时刻 年-月-日	东经/°	北纬/°	震源深度/km	M_W	异常对应图
2009-08-09	137.94	33.17	292	7.1	图 3a, b
2011-03-09	142.84	38.44	32	7.3	
2011-03-11	142.37	38.30	29	9.1	图 3d, e
2011-03-11	141.11	36.28	43	7.9	图 3d, e
2011-03-11	144.59	38.06	19	7.7	图 3d, e
2011-04-07	141.59	38.28	42	7.1	图 3d, e
2012-12-07	143.95	37.89	31	7.3	图 3f
2013-10-25	144.66	37.16	35	7.1	图 2e

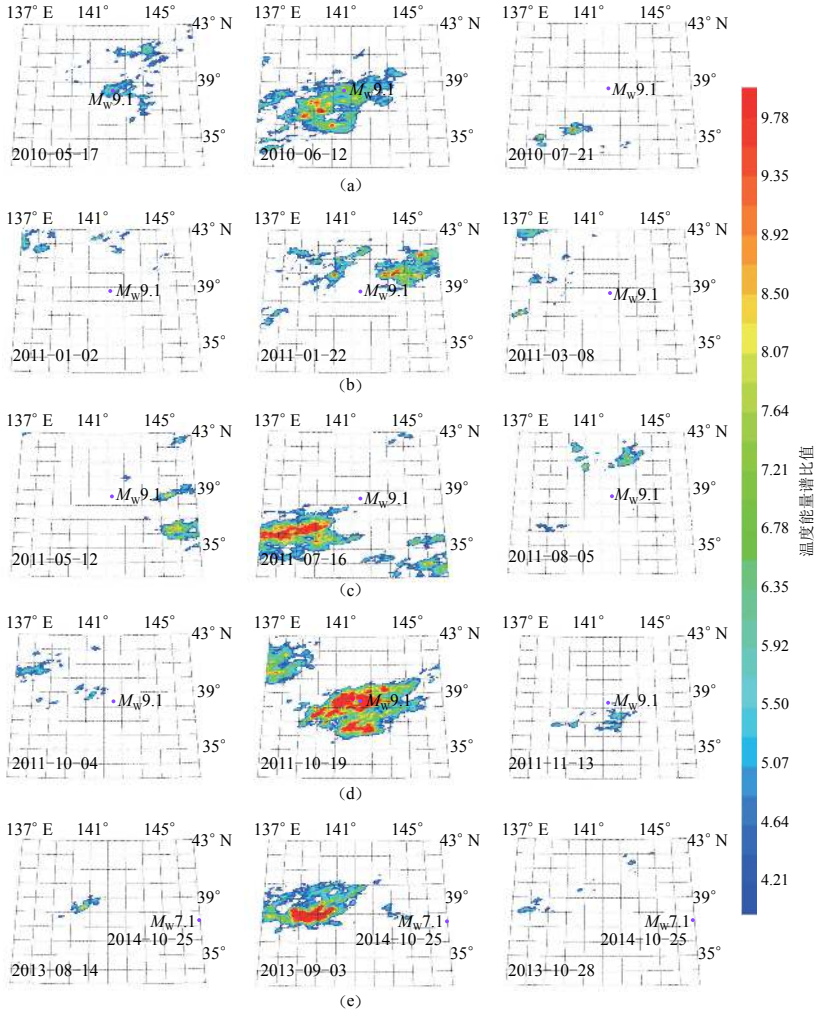


图 2 2011 年 3 月 11 日日本 $M_W9.1$ 地震热辐射背景场的时空演化
(小波因子: 2-7 阶带通滤波; 傅里叶变换窗长: 64 天; 特征周期: 64 天)

Fig. 2 Spatio-temporal evolution of thermal radiation background field caused by the Japan $M_W9.1$ earthquake
(Wavelet factor: 2nd-7th order scale bandpass filtering; Fourier transform window length: 64 days; characteristic period: 64 days)

此次异常可能是由该 $M_W7.1$ 地震所引起, 其余年份均未出现长时间、大范围的热辐射异常, $M_W9.1$ 地震在该时间段对该区域的热辐射背景场造成的影响逐渐减弱直至消失。

2.3 不同尺度地震异常热辐射分析

应用 T-F RPS 小波变换不同阶数(6 阶尺度或 7 阶尺度)并进行不同窗长(64, 128, 256 和 512 天)的傅里叶相对功率谱估计, 通过全部特征周期对 2007—2016 年 10 年间(30°N—45°N, 135°E—150°E)空间范围进行全时空时频扫描, 对比分析不同尺度下的地震热辐射异常。扫描发现 7 阶小波尺度无任何异常, 而 6 次小波变换 6 阶尺度部分不同窗长的相对傅里叶功率谱出现多次异常, 分别为: ① 2009 年 6 月 20 日至 2009 年 12 月 10 日期间出现了 256 天窗长的相对傅里叶变换和 128 天特征周期的热辐射异常(图 3a), 该异常与 2009 年 8 月 9 日 $M_W7.1$ 地震相对应(表 2); ② 2009 年 8 月 31 日至 2009 年 12 月 10 日, 在此期间出现了 128 天窗长的相对

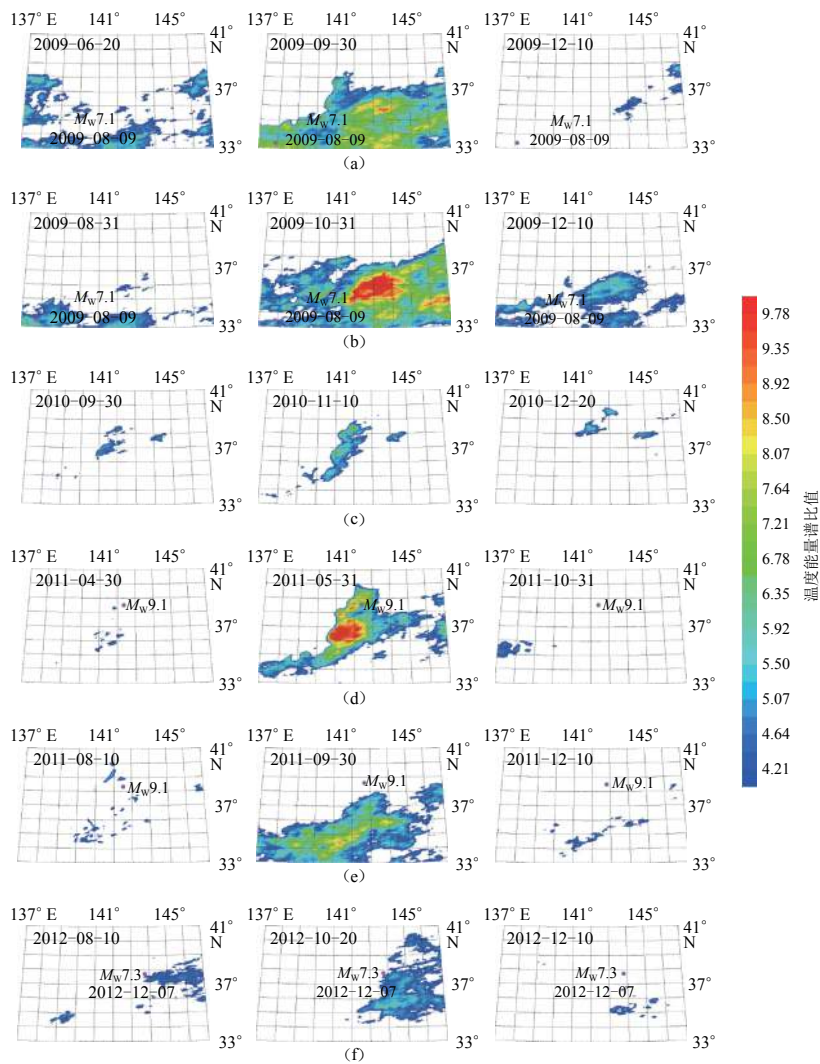


图 3 不同尺度地震热辐射异常特征

图(a)–(f)的小波因子均为6阶尺度,傅里叶变换窗长分别为512, 128, 256, 256, 512和256天,特征周期分别为170, 128, 128, 256, 170和128天

Fig. 3 Characteristics of thermal radiation anomalies in different scales

In Figs. (a)–(f), wavelet factors for are all 6th order scale, Fourier transform window lengths are 512, 128, 256, 256, 512 and 256 days, respectively, and characteristic periods are 170, 128, 128, 256, 170 and 128 days, respectively

傅里叶变换和128天特征周期的热辐射异常(图3b),该异常与2009年8月9日 $M_w7.1$ 地震相对应(表2);③2010年9月30日至2010年12月20日期间出现了256天窗长的相对傅里叶变换和128天特征周期的热辐射异常,无地震对应(图3c);④2011年4月30日至2011年10月31日期间出现了256天窗长的相对傅里叶变换和256天特征周期的热辐射异常(图3d),该异常反映了 $M_w9.1$ 强震及其2011年3次 $M_w>7.0$ 强余震(表2);⑤2011年8月10日至2011年12月10日期间出现了512天窗长的相对傅里叶变换和170天特征周期的热辐射异常(图3e),该异常反映了 $M_w9.1$ 强震及其2011年3次 $M_w>7.0$ 强余震(表2);⑥2012年8月10日

至 2012 年 12 月 10 日期间出现了 256 天窗长的相对傅里叶变换和 256 天特征周期的热辐射异常(图 3f), 该异常与 2012 年 12 月 7 日 $M_w 7.3$ 地震相对应(表 2)。

3 讨论与结论

一次特大地震会对区域热辐射背景场造成较大影响, 本文首次探讨了海域特大地震对区域热辐射背景场的影响, 以便更有效地减少非震因素引起的热辐射背景场异常, 提高地震热辐射异常识别的准度和精度, 夯实异常识别由定性到半定量甚至定量的转变。此外, 应用多尺度的时频功率谱法识别提取地震热辐射异常信息, 也能够更好地提高异常识别的准确性, 并通过归纳总结更多震例建立更合适的分析处理模型。

本文初次研究了 2007—2016 年 10 年间的 TBB 日值数据, 得出地震热辐射异常与地震年份背景场异常区域存在互补性关系。例如, 2011 年 8 月 10 日至 2011 年 12 月 10 日期间出现了 512 天窗长的相对傅里叶变换和 170 天特征周期的热辐射异常, 2011 年 4 月 30 日至 2011 年 10 月 31 日期间出现了 256 天窗长的相对傅里叶变换和 256 天特征周期的热辐射异常, 这两次异常均反映了 $M_w 9.1$ 强震及其 2011 年 3 次 $M_w > 7.0$ 强余震。随着卫星观测时间的积累和分辨率及数据质量的提高, 我们可以归纳出地震热辐射异常特征参数(例如特征周期, 异常幅度, 持续时间, 异常面积和极值出现的时间等)与地域(经纬度)、季节、地质环境和气候因素等方面的相关性, 从而深入地研究地震热辐射异常的各个特征参数的频次和概率分布等, 获得地震信息变化的特征要素, 建立地震热辐射异常的时空特征模型, 提高地震热辐射研究的深度和广度, 为卫星红外遥感地震热异常提供判据, 更好地解决实际问题。

通常区域背景场是相对稳定的, 其表征地球与外太空时刻进行着能量交换, 也体现了地球系统保持着能量平衡。本文所探讨的是一次特大地震($M_w 9.1$)对区域稳定背景场的影响, 从某种程度上来说, 其造成的区域热辐射背景场异常幅度甚至超过了 2007—2016 年这 10 年间几次地震热辐射的异常幅度。本文初次分析了背景场的影响范围和影响时间, 单次震例不足以定论强震对区域热辐射背景场的影响, 总结研究区内 $M_w \geq 7.0$ 地震对区域热辐射背景场影响的异同, 建立定性或定量的影响分析模型, 以便更有效地去除背景异常和非震异常。

根据上述结果及分析, 本文得出如下结论:

1) 应用时频相对功率谱法(T-F RPS)处理中国静止气象卫星 TBB 数据, 易于分析 2011 年 3 月 11 日日本本州东海岸近海 $M_w 9.1$ 地震的热辐射异常。异常特征表现为: ① 特征参数分别为小波变换 6 阶尺度部分、512 天窗长相对功率谱估计和 256 天特征周期; ② 热辐射异常最大幅值约为背景值的 10 倍, 异常幅值与震级无明显的对应关系; ③ 异常时段和形态与 $M_w 9.1$ 地震的发震构造对应较好。

2) 通过全时空全频段时频扫描 2007—2016 年(30°N — 45°N , 135°E — 150°E)空间范围, 得到 2011 年 3 月 11 日日本 $M_w 9.1$ 地震对区域热辐射背景场的影响可分为 3 个阶段: 影响不明显阶段, 震前 2—4 年(2007—2009 年)未出现任何长时间、大范围异常; 主要影响阶段, 震前 1 年和发震年份(2010—2011 年); 影响逐渐减弱阶段, 震后 1 年及以后(2012—2016 年)。

3) 通过多尺度多时频经过全部特征周期进行全时间全空间时频扫描 2007—2016 年 10 年间(30° — 45°N , 135° — 150°E)空间范围, 对比分析研究热辐射背景场影响, 7 阶小波尺度部分没有任何异常信息, 因此不能反映该区域地震热辐射异常, 6 阶小波变换尺度部分经过不同窗长的相对傅里叶功率谱处理共出现 6 次异常。

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, 4 位审稿专家对本文的撰写提出了宝贵的建设性意见, 作者在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 刘力强, 陈国强. 2004. 中国地表亮度温度年变基准场[J]. 地震地质, **26**(3): 528–538.
- Chen S Y, Ma J, Liu P X, Liu L Q, Chen G Q. 2004. Normal annual variation field of land surface temperature in China[J]. *Seismology and Geology*, **26**(3): 528–538 (in Chinese).
- 陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 刘力强. 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.
- Chen S Y, Ma J, Liu P X, Liu L Q. 2009. A study on the normal annual variation field of land surface temperature in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(9): 2273–2281 (in Chinese).
- 郭晓, 张元生, 钟美娇, 沈文荣, 魏从信. 2010. 提取地震热异常信息的功率谱相对变化法及震例分析[J]. 地球物理学报, **53**(11): 2688–2695.
- Guo X, Zhang Y S, Zhong M J, Shen W R, Wei C X. 2010. Variation characteristics of OLR for the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(11): 2688–2695 (in Chinese).
- 郭晓, 张元生, 魏从信, 钟美娇, 张璇. 2013. 芦山 $M_S 7.0$ 地震长波辐射异常现象[J]. 地震学报, **35**(5): 731–737.
- Guo X, Zhang Y S, Wei C X, Zhong M J, Zhang X. 2013. OLR anomalies for the Lushan $M_S 7.0$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(5): 731–737 (in Chinese).
- 郭晓, 张元生, 魏从信, 钟美娇. 2014. 2008 年于田 $M_S 7.3$ 和 2010 年玉树 $M_S 7.1$ 两次地震前中波红外遥感异常研究[J]. 地震学报, **36**(2): 175–183.
- Guo X, Zhang Y S, Wei C X, Zhong M J. 2014. Anomalies of middle infrared brightness before 2008 Yutian $M_S 7.3$ and 2010 Yushu $M_S 7.1$ earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(2): 175–183 (in Chinese).
- 刘海燕, 田钢, 石战结. 2015. 几种时频分析方法的比较和实际应用[J]. CT 理论与应用研究, **24**(2): 199–208.
- Liu H Y, Tian G, Shi Z J. 2015. The comparison of time-frequency analysis methods and their applications[J]. *CT Theory and Applications*, **24**(2): 199–208 (in Chinese).
- 卢振权, 吴必豪, 强祖基, 杜乐天. 2005. 中国近海海域卫星热红外亮温增温异常探讨[J]. 现代地质, **19**(1): 74–82.
- Lu Z Q, Wu B H, Qiang Z J, Du L T. 2005. Brightness temperature anomalies in satellite-based thermal infrared remote sensing along the offshore China seas[J]. *Geoscience*, **19**(1): 74–82 (in Chinese).
- 马瑾, 陈顺云, 刘培洵, 汪一鹏, 刘力强. 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[J]. 地球物理学报, **49**(3): 816–823.
- Ma J, Chen S Y, Liu P X, Wang Y P, Liu L Q. 2006. Temporal-spatial variations of associated faulting inferred from satellite infrared information: A case study of the N-S seismo-tectonic zone in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(3): 816–823 (in Chinese).
- 庞锐, 刘百红, 孙成龙. 2013. 时频分析技术在地震勘探中的应用综述[J]. 岩性油气藏, **25**(3): 92–96, 101.
- Pang R, Liu B H, Sun C L. 2013. Review on time-frequency analysis technique and its application in seismic exploration[J]. *Lithologic Reservoirs*, **25**(3): 92–96, 101 (in Chinese).
- 强祖基, 徐秀登, 赁常恭. 1990. 卫星热辐射异常: 临震前兆[J]. 科学通报, **35**(17): 1324–1327.
- Qiang Z J, Xu X D, Lin C G. 1990. Satellite thermal radiation anomaly: Impending earthquake precursor[J]. *Chinese Science Bulletin*, **35**(17): 1324–1327 (in Chinese).
- 强祖基, 赁常恭, 李玲芝, 徐旻, 戈风沙, 柳涛, 赵勇, 郭满红. 1998. 卫星热红外图像亮温异常: 短临震兆[J]. 中国科学: D 辑, **28**(6): 564–573.
- Qiang Z J, Lin C G, Li L Z, Xu M, Ge F S, Liu T, Zhao Y, Guo M H. 1999. Satellite thermal infrared brightness temperature anomaly image: Short-term and impending earthquake precursors[J]. *Science in China: Series D*, **42**(3): 313–324.
- 王涛, 孟凡顺, 李洋森, 蓝星. 2013. 不同时频分析方法的精度比较及应用[J]. 海洋地质前沿, **29**(3): 60–64.
- Wang T, Meng F S, Li Y S, Lan X. 2013. The comparison of time-frequency analysis methods and their application[J]. *Marine Geology Frontiers*, **29**(3): 60–64 (in Chinese).
- 魏从信, 张元生, 惠少兴. 2011. 2009 年 8 月 11 日安达曼群岛 $M_S 7.5$ 地震热红外变化[J]. 地震研究, **34**(2): 153–157.
- Wei C X, Zhang Y S, Hui S X. 2011. Thermal-infrared variation of $M_S 7.5$ Andaman Islands earthquake on August 11, 2009[J].

- Journal of Seismological Research*, **34**(2): 153–157 (in Chinese).
- 魏从信, 张元生, 郭晓, 秦满忠, 宁亚灵, 高见. 2013. 玉树 7.1 级地震热红外与长波辐射异常[J]. 地球物理学进展, **28**(5): 2444–2452.
- Wei C X, Zhang Y S, Guo X, Qin M Z, Ning Y L, Gao J. 2013. Thermal infrared and long-wave radiation anomalies of Yushu $M_s7.1$ earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(5): 2444–2452 (in Chinese).
- 魏从信, 张元生, 郭晓. 2014. 中国大陆及邻近海域的中强地震热红外异常研究[J]. 红外, **35**(10): 35–40.
- Wei C X, Zhang Y S, Guo X. 2014. Study of thermal infrared anomalies of moderately strong earthquakes in mainland and adjacent sea of China[J]. *Infrared*, **35**(10): 35–40 (in Chinese).
- 张猛刚, 洪忠, 窦玉坛, 崔晓杰. 2013. 时频分析在苏里格地区含气性检测中的应用[J]. 岩性油气藏, **25**(5): 76–80, 85.
- Zhang M G, Hong Z, Dou Y T, Cui X J. 2013. Application of time-frequency analysis technology to the gas detection in Sulige area[J]. *Lithologic Reservoirs*, **25**(5): 76–80, 85 (in Chinese).
- 张璇, 张元生, 魏从信, 田秀丰, 冯红武. 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.
- Zhang X, Zhang Y S, Wei C X, Tian X F, Feng H W. 2013a. Thermal infrared anomaly prior to Yiliang of Yunnan $M_s5.7$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(1): 171–176 (in Chinese).
- 张璇, 张元生, 魏从信, 田秀丰, 汤倩, 高见. 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.
- Zhang X, Zhang Y S, Wei C X, Tian X F, Tang Q, Gao J. 2013b. Analysis of thermal infrared anomaly before the Lushan $M_s7.0$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(2): 272–277 (in Chinese).
- 张元生, 沈文荣, 徐辉. 2002. 新青 8.1 级地震前卫星热红外异常[J]. 西北地震学报, **24**(1): 1–4.
- Zhang Y S, Shen W R, Xu H. 2002. Satellite thermal infrared anomaly before the Xinjiang-Qinghai border $M_s8.1$ earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **24**(1): 1–4 (in Chinese).
- 张元生, 郭晓, 张小美, 李明永. 2004. 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, **26**(2): 113–117.
- Zhang Y S, Guo X, Zhang X M, Li M Y. 2004. Study on the inversion method of land surface temperature by applying IR bright temperature data of still satellite[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **26**(2): 113–117 (in Chinese).
- 张元生, 郭晓, 魏从信, 沈文荣, 惠少兴. 2011. 日本 9 级和缅甸 7.2 级地震热辐射表现特征[J]. 地球物理学报, **54**(10): 2575–2580.
- Zhang Y S, Guo X, Wei C X, Shen W R, Hui S X. 2011. The characteristics of seismic thermal radiation of Japan $M_s9.0$ and Myanmar $M_s7.2$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(10): 2575–2580 (in Chinese).
- Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, Shilin B B. 1988. The earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. *Proc Acad Sci USSR*, **30**(1): 67–69.
- Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. 1991a. Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes[J]. *Chinese Science Bulletin*, **36**(4): 319–323.
- Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. 1991b. Impending-earthquake satellite thermal infrared and ground temperature increase anomalies[J]. *Chinese Science Bulletin*, **36**(22): 1894–1900.
- Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. 1991c. Thermal infrared anomalies under the non-temperature-increment background and the mechanism discussion[J]. *Chinese Science Bulletin*, **36**(22): 1901–1906.
- Qiang Z J, Kong L C, Zheng L Z, Guo M H, Wang G P, Zhao Y. 1997. An experimental study on temperature increasing mechanism of satellitic thermal-infrared[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **10**(2): 247–252.
- USGS. 2013. M9.1: Near the east coast of Honshu, Japan[EB/OL]. [2013-03-11]. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120_30#region-info.
- Wei C X, Zhang Y S, Gui X, Hui S X, Qin M Z, Zhang Y. 2013. Thermal infrared anomalies of several strong earthquakes[J]. *Sci World J*, **2013**: 208407.
- Xu X D, Xu X M, Ma S D, Luo Y. 1995. Preliminary inquiry into the causes of anomaly increase of air temperature by an impending earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **8**(1): 149–154.
- Zhang Y S, Guo X, Zhong M J, Shen W R, Li W, He B. 2010. Wenchuan earthquake: Brightness temperature changes from satellite infrared information[J]. *Chinese Science Bulletin*, **55**(18): 1917–1924.