

郭瑛霞, 张丽峰, 郭昱琴, 等. 应用卫星热红外资料研究江苏及邻区地震热异常变化[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 19-30. [GUO Yingxia, ZHANG Lifeng, GUO Yuqin, et al. Study of Thermal Anomalies of Earthquakes in Jiangsu Province and Its Adjacent Areas by Using Satellite Thermal Infrared Data [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 19-30]

应用卫星热红外资料研究江苏及 邻区地震热异常变化

郭瑛霞^{1,2}, 张丽峰^{1,2}, 郭昱琴³, 黄浩^{1,2}, 胡维云^{1,2}, 李振凯²

(1. 青海格尔木青藏高原内部地球动力学野外科学观测研究站, 西宁 810001; 2. 青海省地震局, 西宁 810005;
3. 海南省地震局, 海口 570203)

摘要: 应用地球静止气象卫星风云二号相当黑体亮温产品数据, 以小波分析和相对功率谱估计方法为基础, 选取主要“沿郯庐断裂带”的地震区以及江苏省以南的地震区带, 提取此区域2006—2020年 $M_L \geq 4.3$ 级35个地震。通过分析其热红外异常特征, 结果表明: 其中有18个地震存在明显的热红外异常, 对比异常演化过程皆表现为: 异常出现→逐渐增强持续→减弱消失, 但不同地震出现异常的特征周期不同, 主要以前三个周期为主, 地震大多发生在异常达到峰值后三个月内, 对地震发生的短期预测有一定的指示意义。异常的最大幅值与震级无正相关关系, 有的幅值大震级反而较小, 故从峰值方面对地震大小的判定存在困难。所得研究结果可为东部地区应用热红外资料研究地震预测提供参考。

关键词: 江苏及邻区; 热红外异常; 小波分析; 相对功率谱法

中图分类号: P315.728

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0019-12

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.03

Study of Thermal Anomalies of Earthquakes in Jiangsu Province and Its Adjacent Areas by Using Satellite Thermal Infrared Data

GUO Yingxia^{1,2}, ZHANG Lifeng^{1,2}, GUO Yuqin³, HUANG Hao^{1,2},
HU Weiyun^{1,2}, LI Zhenkai²

(1. Geodynamics Field Observation and Research Station of the Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810001, China;
2. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China; 3. Hainan Earthquake Agency, Haikou 570203, China)

Abstract: On the basis of wavelet analysis and relative power spectrum estimation method, 35 earthquakes with $M_L \geq 4.3$ in the seismic zone along the Tanlu fault zone and the seismic zone in the south of Jiangsu Province from

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 青海格尔木青藏高原内部地球动力学野外科学观测研究站专项; 2023年青海省地震局地震科学基金课题(2023A02); 江苏省地震局青年科学基金(202109); 2023年度震情跟踪定向工作任务(2023010114)联合资助。

作者简介: 郭瑛霞(1990-), 女, 助理工程师, 主要从事地震活动性及地震热辐射异常研究。

E-mail: 932319938@qq.com

通信作者: 张丽峰(1989-), 女, 工程师, 主要从事地震活动性及地震热辐射异常研究。

E-mail: ZhangLFng@163.com

2006 to 2020 are extracted based on the product data of geostationary meteorological satellite FY-2 equivalent to blackbody brightness temperature products. By analyzing the characteristics of its thermal infrared anomalies, the results show that 18 earthquakes have obvious thermal infrared anomalies, and the evolution process of the comparative anomalies is as follows: anomaly appears \rightarrow gradually increases and continues \rightarrow weakens and disappears. However, the characteristic periods of anomalies in different earthquakes are different, mainly in the first three periods, and most earthquakes occur within three months after the peak of the anomaly, which has certain indicative significance for the short-term prediction of earthquake occurrence. There is no positive correlation between the maximum amplitude of the anomaly and the magnitude, and some earthquakes with large amplitudes have smaller magnitudes, so it is difficult to judge the magnitude of the earthquake from the peak value. The results can provide a reference for the application of thermal infrared data in earthquake prediction in the eastern region.

Keywords: Jiangsu and its adjacent areas; Thermal anomalies; Wavelet analysis; Relative power spectrum method

0 引言

自1988年Gorny等^[1]发现加兹利的许多地震在震前存在卫星热红外异常,首次提出将热红外遥感数据用于地震研究,引起了国内外研究学者的广泛关注并快速发展。地震前后的温度异常现象可用遥感技术分析,不少地震学者开始进行热红外异常的成因理论研究^[2-4]、岩石实验研究^[5-6]、典型震例异常识别^[7-9]以及不同遥感方法异常特征提取对比^[10]。强祖基等对中强地震前增温异常的机理研究提出“地球放气说”和“瞬变电场”,认为震前温室气体需在瞬变电场的作用下才会引起增温,通过对多年遥感图像资料进行研究发现地壳在9大破裂前会出现明显的增温前兆^[11-12]。耿乃光等利用红外辐射仪和光谱仪做岩石实验,得出随着应力的施加,岩石破裂过程中向外辐射的电磁波能量随之增加^[6]。刘德富等发现强震前到强震发生,震中周围地区会显示长波辐射异常,可望提取热前兆,为地震监测预报强震开辟新技术^[8]。张元生等提出“双通道多时相反演”方法,用于提取遥感资料中地表辐射温度的热兆异常^[13]。郭晓等通过NOAA—AVHRR数据基于分裂窗反演技术结果易受到云层干预,提出热红外地震监测预报数据应用向透过云层的更高分辨率的EOS/MODIS数据拓展^[14]。郭晓等利用长波辐射资料,提出了一种提取热红外前兆的有效方法“功率谱相对变化法”,并有效应用到相关地震预报研究中^[15]。

马宗晋等对1966—1976年十年间发生的中国九大地震进行调查,发现地震前存在与构造活动

有关的热异常现象^[6]。刘德富等利用长波辐射资料对1976—1985年龙陵、唐山、松潘、乌恰、共和五个地区发生的7级以上地震进行分析,发现强震发生前一个月,震区周围都存在较为显著的热红外辐射异常^[17]。张元生等在典型震例前兆异常提取上利用地球热红外遥感亮温资料对新青8.1级地震、汶川8.0级和于田7.3级地震等几次不同震级的地震研究发现,这些地震前都存在明显的热异常^[8, 19]。把红外异常信息作为地震前兆信息已取得很大的进展,多年热红外异常研究积累了大量热红外遥感资料(2005—2020年),大量的地震样本为分析地震热红外异常特征提供了基础数据。现代监测有大范围地球物理场整体观测能力不足,以及对前兆异常缺乏科学评估等弊端。目前地震研究注重积累大量的观测资料,而建立密集的台站收集地震数据,花费大量的人力和经费。相对于台站的“点”观测,遥感技术具有获取人类无法观测的无资料区的数据信息、花费少等优势。

以往的震例研究多是针对西部地区,而这些地方的地震都以大震或者巨震为主,对于东部及沿海地区,热红外方面的研究与应用较少。张璇等指出热辐射变化本身虽然在地域敏感程度上存在一些差别,但是震级相对小点的地震也会产生热辐射异常^[20]。于是本文利用遥感资料对江苏及邻区热红外亮温数据进行分析,研究该区热红外亮温正常背景和异常变化特征,结合研究区地震分析周围中强震前热红外时空演化特征,探讨热红外异常与地震的关系,提出未来可能的发震区域和发震时段,同时也是对地震热红外异常研究方法的补充与拓展,具有一定的应用前景。

1 数据资料与方法

本文所使用的数据为中国静止气象卫星风云二号系列的相当黑体温度(TBB)亮温产品信息数据,为避免太阳的直接辐射,一般选取凌晨1:00~5:00多个时次的文件,对数据进行简单去云处理后得到每天的亮温网格数据,网格为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,星下点分辨率为5 km。对上述数据进行小波变换分析,依据地震热辐射异常的影响因素具有不同周期这一特征,来去除云雨等短周期因素及地球年变温度场等长周期成分;以60 d为窗长,1 d为滑动窗长对去除影响因素后的亮温数据进行傅里叶变换,得到6个频率对应的功率谱,为对比地震前后功率谱的不同,对各频率的功率谱以年均值为背景取幅值相对变化,最终结果为每个像元每个频率每天的相对功率谱值。数据处理流程可概括为:首先选取TBB午夜时间1:00~5:00多个时次的文件,以二进制格式顺序存储数据入库;然后采用小波变换滤波得到每个像素在时域内具有正负相位的亮温数据波形,再以时间窗长60 d和滑动窗长1 d进行傅里叶变换;最后进行异常扫描和提取,获取地震热红外异常信息。

文中小波分析采用Daubechies小波方法,是一种迭代产生的方法,通常称为dbN,N代表小波阶数,首先对部分去除云雨影响的数据求均值得到日值,然后采用db8小波基对数据进行处理,用

2阶尺度部分减去7阶尺度部分的差值,相当于进行带通滤波,3至6阶细节部分累加至7阶细节分量,消除高频和低频的信息。去除2阶细节部分可消除云雨等短周期变化对数据的影响,去除7阶尺度部分的目的是消除地球温度场年变等高频长周期部分对结果的影响。采用的相对功率谱估计方法是对功率谱数据做相对处理,以得到谱幅值,利用傅里叶变换获得的时频数据对研究区域进行全时空、全频段的扫描,寻找幅值变化较大的频率时间和区域空间,构成时序曲线和异常演化图,以便对可能的发震区域进行异常分析。

东部地区地震主要沿郯庐断裂带活动,郯庐断裂带长2400多公里,切穿中国东部不同大地构造单元,是地壳断块差异运动的接合带。它向南延申至湖北的武穴,向北北方向途径安徽省的宿松、潜山、庐江、嘉山,江苏省的泗洪、宿迁,山东省的郯城、沂水、潍坊进渤海,然后过辽东半岛穿过东北三省到达俄罗斯。历史上1668年的山东郯城8.5级地震、1969年渤海中部7.4级地震、1975年辽宁海城7.3级地震等都发生在郯庐断裂带上或其附近。本文的研究区域为江苏及邻区,以中国大陆地质构造单元划分,该区自北向南依次位于华北地块、扬子地块与华南褶皱系内,区内地质构造复杂,主要包括“沿郯庐断裂带”的地震区以及江苏省以南的地震区带,经纬度范围选择为 $25^{\circ} \sim 39^{\circ} \text{N}$, $112^{\circ} \sim 124^{\circ} \text{E}$,选取2006年1月1日—2020年12月31日的 $M_L \geq 4.3$ 以上地震共35个,见表1。

表1 研究区所选 $M_L \geq 4.3$ 以上地震目录及发震断裂参数

Table1 Earthquake catalogue with $M_L \geq 4.3$ selected in the study area and their seismogenic fault parameters

序号	发震时间/年-月-日 h:min	纬度/($^{\circ}$)	经度/($^{\circ}$)	震级/ M_L	地点	发震断裂	断层参数
1	2006-04-09 T17:23	35.40	115.24	4.7	河南范县	聊兰断裂中南段	NNE-NE向走滑
2	2006-07-26 T05:18	32.32	117.37	4.7	安徽定远县	定远-颖上断裂和固镇断裂	NW向左旋走滑
3	2007-08-29 T07:28	25.38	117.50	5.1	福建永春县	永安-晋江断裂带	NW向走滑
4	2008-03-06 T21:58	26.23	118.40	4.8	福建古田县	闽江断裂带	NE向倾滑正断层
5	2008-03-10 T05:45	34.53	114.44	4.7	河南封丘长垣与兰考交界	未找到相关断层信息	

(转下表)

(接表1)

序号	发震时间/年-月-日 h:min	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_L	地点	发震断裂	断层参数
6	2008-07-05 T09:00	24.73	117.70	4.7	福建长泰县	九龙江断裂	EW向走滑断层
7	2009-03-28 T19:11	38.51	112.57	4.5	山西原平县	山西地震带的忻定盆地	走滑兼逆冲
8	2010-01-15 T17:16	35.43	115.22	4.3	安徽安庆市	未找到相关断层信息	
9	2010-06-05 T20:58	38.11	112.38	5.1	山西阳曲县	隐伏断层	倾滑型断层
10	2010-10-24 T16:58	34.00	114.42	5.1	河南太康县	周口—太康断裂	NW向走滑型
11	2011-01-19 T12:07	30.39	117.06	5.1	安徽安庆市	宿松—枞阳断裂	NE向走滑
12	2011-03-08 T00:19	34.00	114.39	4.7	河南太康县	周口—太康断裂	走滑型
13	2011-09-10 T23:20	29.42	115.30	5.0	江西瑞昌市湖北阳新县交界	瑞昌—武穴断裂	带少量正断分量的走滑型
14	2011-10-13 T12:27	35.45	115.30	4.4	河南范县	聊兰断裂	NE走滑型
15	2012-07-20 T20:24	33.03	119.34	4.9	江苏宝应县	滁河断裂	NE-SW向走滑
16	2012-07-20 T20:11	33.12	119.61	5.2	江苏宝应县	滁河断裂	NE-SW向走滑
17	2013-08-03 T02:43	25.63	118.75	4.5	福建仙游县	为沙县—南日岛断裂带,属于水库诱发震群	NW向右旋走滑
18	2013-09-04 T06:23	25.63	118.75	5.2	福建仙游县	为沙县—南日岛断裂带,属于水库诱发震群	NW向右旋走滑
19	2013-10-30 T01:50	25.60	118.80	4.8	福建仙游县	为沙县—南日岛断裂带,属于水库诱发震群	NW向右旋走滑
20	2013-11-23 T13:44	37.10	120.00	5.0	山东莱州市	柞村断裂与莱州断裂附近,	NE向右旋走滑
21	2014-01-07 T02:49	25.44	122.54	4.7	山东乳山市	隐伏断裂	NW向近直立走滑型
22	2014-01-18 T23:53	32.48	121.64	4.5	山东乳山市	隐伏断裂	NW向近直立走滑型
23	2014-04-20 T16:00	31.22	116.07	4.4	安徽霍山县	落儿岭—土地岭断裂	右旋张性走滑地震

(转下表)

(接表1)

序号	发震时间/年-月-日 h:min	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_L	地点	发震断裂	断层参数
24	2014-09-23 T13:20	27.65	119.95	4.5	浙江文成县	双溪—焦溪垵断裂第3分支(属于震群活动)	NW向走滑
25	2014-10-25 T18:42	27.65	120.00	4.7	浙江文成县	双溪—焦溪垵断裂第3分支(属于震群活动)	NW向走滑
26	2015-01-18 T11:01	35.41	115.23	4.4	河南范县	聊兰断裂	NE向走滑
27	2015-03-14 T14:13	33.01	115.53	4.8	安徽阜阳市	临泉刘府断裂	NWW向走滑
28	2015-05-22 T00:05	36.85	121.90	5.0	山东威海市	未找到相关断层信息	
29	2016-04-07 T04:49	38.85	112.91	4.7	山西原平市	平行于五台山北麓断裂的隐伏断裂	NEE向正断兼走滑
30	2016-10-20 T04:51	33.38	120.19	4.8	江苏射阳县	洪泽沟墩断裂与盐城断裂之间	NE向左旋走滑
31	2016-12-18 T11:08	37.59	112.45	4.8	山西清徐县	田庄断裂	NEE向走滑为主,略带逆冲分量
32	2017-04-12 T02:25	30.06	119.21	4.6	浙江临安市	马金—乌镇断裂	NE向正断
33	2019-12-26 T18:36	30.85	113.40	5.3	湖北应城市	皂市断裂与长江埠断裂的共同活动	走滑兼逆冲
34	2020-01-06 T22:21	38.00	120.39	4.3	山西祁县	未找到相关断层信息	
35	2020-02-18T17:07	36.47	116.61	4.6	山东济南市长清区	隐伏次级断裂	NW向左旋走滑

2 计算结果分析

本文分析了2006年以来至2020年东部地区 $M_L \geq 4.3$ 的所有地震,共35个。对震中及附近所在区域的范围($10^\circ \times 10^\circ$)利用遥感资料对热红外亮温数据进行分析,震前时间跨度选取6个月,为了展示时空演化过程以及受图幅篇幅的限制,人为设置每隔3d出一副相对功率谱图,提取与地震有关的热红外异常信息,并结合地质构造、断层信息等对比异常形态、震中与异常相对位置、特征周期等方面的异同,研究异常特征与断裂带构造活动

等因素的关系,为未来利用热红外遥感数据预测地震提供一些判定依据。

2.1 地震热红外异常信息提取结果

在一些地震前,并没有出现可识别的热红外异常信息;而部分地震前后则热异常显著,有的地震发生在异常达到最大值前;有的地震发生在异常达到最大值后数日至数月,可识别到某一特征周期下明显的地震热红外异常,且异常区域面积相对较大,幅值较高;有的则发生在整个异常从出现直至消失后。比如2012年7月20日江苏宝

应 M_L 5.2地震,地震发生在异常达到最大值前18 d,震中经纬度为 119.61°E , 33.03°N ,设定扫描的空间地理范围为 $28^\circ\sim 38^\circ\text{N}$, $114^\circ\sim 124^\circ\text{E}$,从地震发生前后的相对功率谱时空演化图中明显看出,第一特征周期(64 d)震前8 d异常出现,即7月12日在震中附近出现近东西向的异常条带至地震发生,随着时间的推移异常范围不断扩大,8月7日异常达到最大值,9月初异常基本消失(图1)。

2016年10月20日江苏射阳 M_L 4.8地震,震中经纬度为 120.19°E , 33.38°N ,设定扫描的空间地理范围为 $28^\circ\sim 38^\circ\text{N}$, $115^\circ\sim 125^\circ\text{E}$,从地震发生前后的相对功率谱时空演化图中看出,第三特征周期(64 d)震前20 d出现异常,9月30日开

始异常主要分布在震中东北部,震中附近出现近东北向的异常条带,10月19日异常达到最大,地震在异常最强阶段发生,发生在异常达到最大值后1 d(图3)。

2010年10月24日河南太康 M_L 5.1地震,震中经纬度为 114.42°E , 34.00°N ,设定扫描的空间地理范围为 $29^\circ\sim 39^\circ\text{N}$, $109^\circ\sim 119^\circ\text{E}$,地震发生在整个异常周期结束后5 d,在地震发生前后的相对功率谱时空演化图中看出,第一特征周期(64 d)震前2010年9月1日出现异常,异常主要分布在震中东北部,震中附近出现近东北向的异常条带,9月23日异常达到最大,之后异常逐渐减弱至10月20日消失,地震在异常结束后5 d发生(图5)。

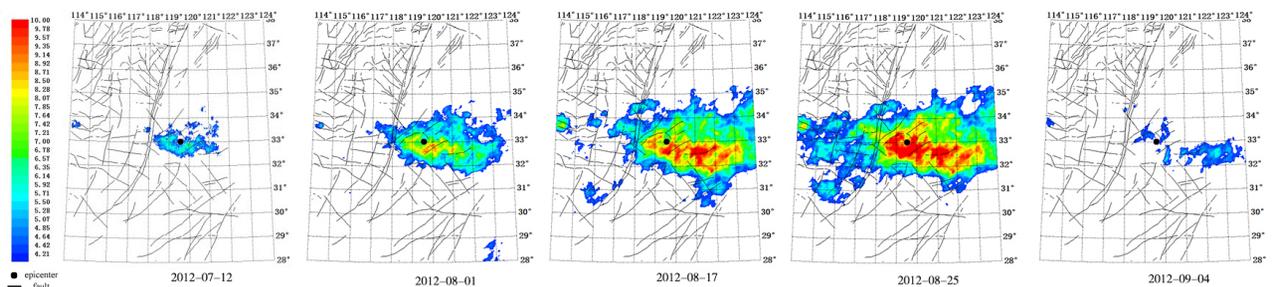


图1 江苏宝应地震热红外异常时空演化图

Fig.1 Temporal and spatial evolution map of thermal infrared anomaly of Baoying earthquake in Jiangsu Province

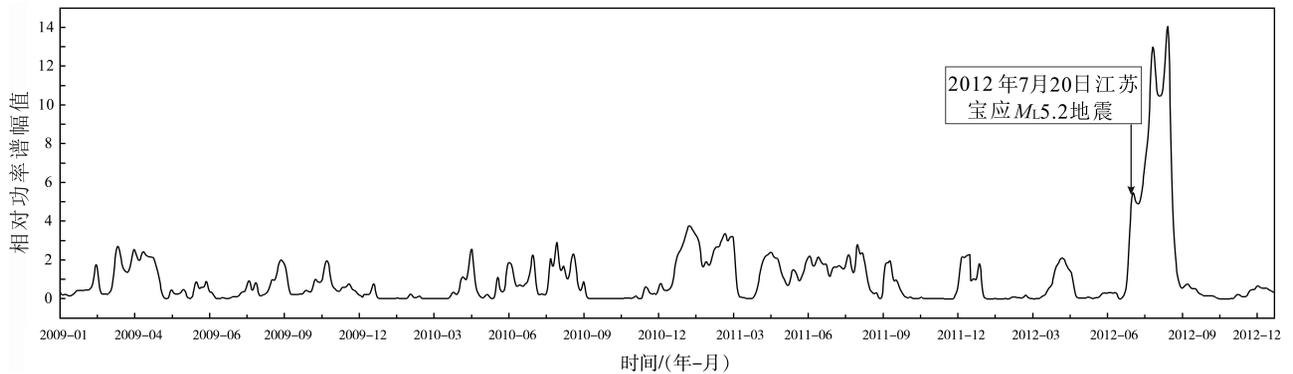


图2 江苏宝应地震相对功率谱时序曲线

Fig.2 Time series curve of relative power spectrum of Baoying earthquake in Jiangsu Province

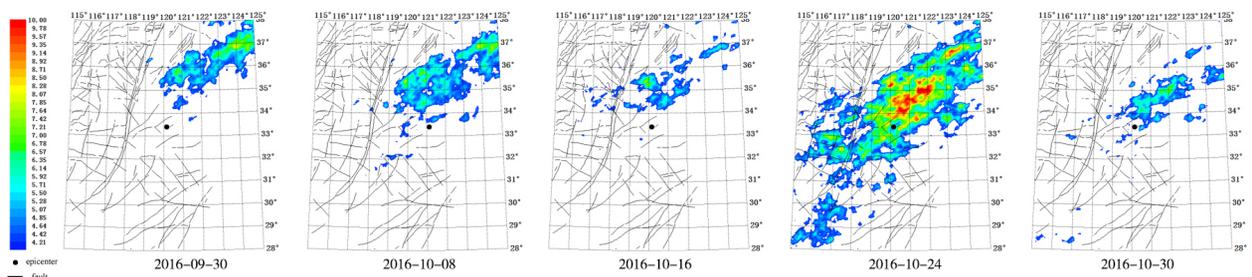


图3 江苏射阳地震热红外异常时空演化图

Fig.3 Temporal and spatial evolution map of thermal infrared anomaly of Sheyang earthquake in Jiangsu Province

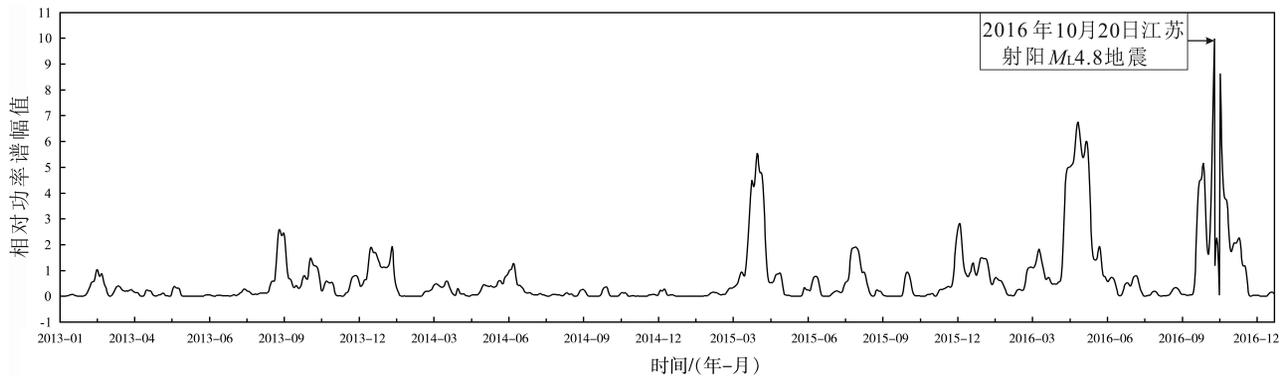


图4 江苏射阳地震相对功率谱时序曲线

Fig.4 Time series curve of relative power spectrum of Sheyang earthquake in Jiangsu Province

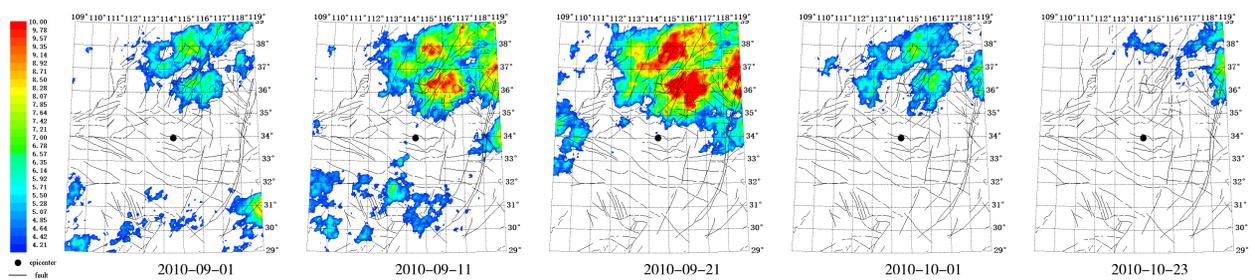


图5 河南太康地震热红外异常时空演化图

Fig.5 Temporal and spatial evolution map of thermal infrared anomaly of Taikang earthquake in Henan Province

2010年6月5日山西阳曲 M_L 5.1级地震,震中经纬度为 $112.38^\circ E$, $38.11^\circ N$, 设定扫描的空间地理范围为 $33^\circ \sim 43^\circ N$, $107^\circ \sim 117^\circ E$, 地震发生在最大值后两个月内,在地震发生前后的相对功率谱时空演化图中看出,第三特征周期(21 d)震前2010

年3月7日出现异常,震中位于异常突出的边缘,发震隐伏断裂在异常区域内,4月10日后异常面积达到最大,之后异常逐渐减弱至5月6日消失,地震在异常结束后30 d发生(图7)。

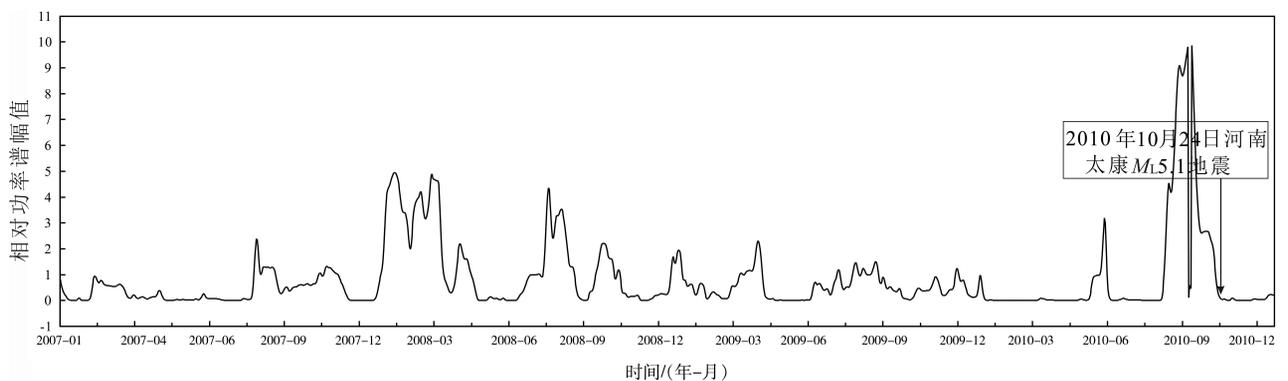


图6 河南太康地震相对功率谱时序曲线

Fig.6 Time series curve of relative power spectrum of Taikang earthquake in Henan Province

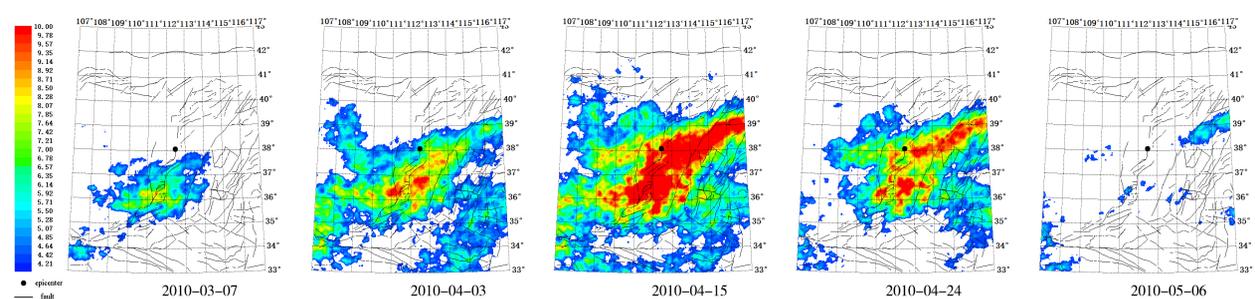


图7 山西阳曲地震热红外异常时空演化图

Fig.7 Temporal and spatial evolution map of thermal infrared anomaly of Yangqu earthquake in Shanxi Province

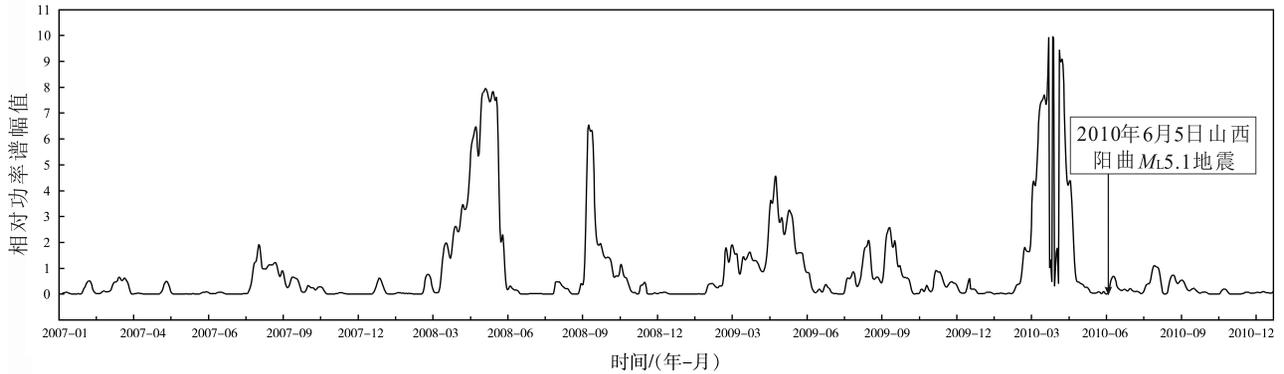


图8 山西阳曲地震相对功率谱时序曲线

Fig.8 Time series curve of relative power spectrum of Yangqu earthquake in Shanxi Province

2.2 热异常结果分析对比

研究过程中所选择的35个地震中,18个地震有明显的热红外异常,所占比例约为50%,不同地震具有不同的特征周期。6个特征周期,每个地震前出现异常的特征周期不一样,主要以前三个周期为集中,第一至第六特征周期分别为64 d、32 d、21 d、16 d、14 d、11 d,出现异常的18个地震中,在前三个周期出现异常的地震有12个,占比67%,在前两个周期出现异常的地震有10个,占比56%,以往研究发现如果发震时段气温高降雨少时,会有特征周期较长的现象;降雨多时则有特征周期较短的可能^[21]。在特征周期异常值统计中,异常达到最大值前发生的地震有3个,占比为17%;异常达到最大值后发生的地震有13个,占比为72%(表2)。异常总体特征为出现→最大→消失的过程,10个5级地震中6个震前出现异常,异常的最大峰值与震级无明显关系。从相对功率谱时空演化图中看出大多数异常的面积与震级有关联,面积越大,震级越大。

2012年7月20江苏宝应地震选取热辐射较强区域(32.5°~33.0°N, 119.5°~120°E),研究近3年数据的相对功率谱曲线变化,从相对功率谱时序曲线图中看出,箭头位置指示地震发生时刻和对应幅值,在2012年8月7日相对功率谱达到峰值,峰值为平均值的14倍,地震发生在峰值前18天,震级与最大峰值不一定相关(图2)。2016年10月20江苏射阳地震选取热辐射较强区域(34.0°~34.5°N, 120.5°~121°E),研究近3年数据的相对功率谱曲线变化,从相对功率谱时序曲线图中发现,在2016年10月19日相对功率谱达到峰值,峰值为平均值的9倍,地震发生在幅值达到峰值后1 d,震级与

最大峰值不相关(图4)。2010年10月24河南太康地震选取热辐射较强区域(36.0°~36.5°N, 115°~115.5°E),研究近3年数据的相对功率谱曲线变化,从相对功率谱时序曲线图中分析,在2010年9月23日相对功率谱达到峰值,峰值为平均值的12倍,后异常逐渐减弱至10月20日消失,地震在异常结束后5天发生,同时发生在最大值后两个月内,震级与最大峰值不相关(图6)。2010年6月5日山西阳曲地震选取热辐射较强区域(37.5°~38.0°N, 112.8°~113.3°E),研究近3年数据的相对功率谱曲线变化,从相对功率谱时序曲线图中得出,在2010年4月10日相对功率谱达到峰值,峰值为平均值的11倍,后异常逐渐减弱至5月6日消失,地震发生在最大值后两个月内,震级与最大峰值不相关(图8)。

2.3 断层性质

研究区内的地震断层性质多为走滑型,异常都出现在震中附近区域,且大部分地震热红外异常形态与断层走向基本一致。但也有地震的异常形态是团块状,比如2010年河南太康地震等(表2),不同地震具有不同的特征周期,特征周期与断层展布形态无显著规律。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以中国静止气象卫星风云二号系列相当黑体温度(TBB)亮温产品信息数据为资料,选取2006年至2020年江苏及邻区 $M_L \geq 4.3$ 的35个地震,通过分析其热红外异常特征,主要得到如下结果与

认识:

应用小波变换和傅氏相对功率谱方法,能有效提取地震热红外异常信息,凡出现热辐射异常的地震,空间上的演化过程都可总结为3个阶段:初始零星阶段→逐渐增强持续阶段→减弱消失阶段。有的地震发生在异常达到最大值前;有的地震发生在异常达到最大值后数日至数月;有的则

发生在整个异常从出现直至消失后,也有震例反复出现“异常出现→增强持续→减弱消失”这个过程。异常形态多为团块状或与断裂带走向一致的条带状,但也存在与断裂垂直的现象,震中往往位于异常一侧的边缘或者异常突出区域内,异常区的范围会随时间逐渐增大,大多数异常的面积与震级有关联,面积越大,震级越大。

表2 研究区热红外亮温相对功率谱异常特征统计对比表
Table 2 The statistical comparison table of anomaly characteristics of relative power spectrum of thermal infrared brightness temperature in the study area

序号	发震时间/年-月-日	震级/ M_L	地点	特征周期	开始时间/年-月-日	结束时间/年-月-日	最大峰值(时间)	发震时间	异常形态与断层关系
1	2006-04-09	4.7	河南濮阳市	5/6	2005-12-09	2005-12-19	7.81 (2005-12-12)	最大值后3月	近东西方向异常条带,震中位于异常区内
2	2006-07-26	4.7	安徽定远县	2	2006-05-11	2006-06-14	9.59 (2006-05-21)	最大值后65 d	北东向异常条带,震中位于异常边缘
3	2007-08-29	5.1	福建永春县			无异常			
4	2008-03-06	4.4	福建古田县			无异常			
5	2008-03-10	4.7	河南封丘长垣与兰考交界			无异常			
6	2008-07-05	4.7	福建长泰县			无异常			
7	2009-03-28	4.5	山西原平县			无异常			
8	2010-01-15	4.3	安徽安庆市			无异常			
9	2010-06-05	5.1	山西阳曲县	3	2010-03-07	2010-05-06	9.97 (2010-04-10)	最大值后55 d	震中位于异常突出的边缘,隐伏断裂在异常区内
				4	2010-04-19	2010-06-08	2010-0403	最大值后62 d	
10	2010-10-24	5.1	河南太康县	1	2010-09-01	2010-10-19	9.87 (2010-09-23)	恢复后5 d	团块状异常,震中位于异常突出的西南边缘
				6	2010-06-23	2010-09-17	2010-08-26	最大值后两月	
11	2011-01-19	5.1	安徽安庆市	4	2010-11-03	2010-11-23	9.69 (2010-11-17)	最大值后两月	北东向异常条带,震中位于带状异常区的东南边缘,异常形态与断层走向一致
12	2011-03-08	4.7	河南太康县			无异常			
13	2011-09-10	5.0	江西瑞昌市			无异常			
14	2011-10-13	4.4	河南范县			无异常			

(转下表)

(接表2)

序号	发震时刻/ 年-月-日	震级/ M_L	地点	特征 周期	开始时间/ 年-月-日	结束时间/ 年-月-日	最大峰值 (时间)	发震时间	异常形态与断层 关系
15	2012-07-20	4.9	江苏宝应县	1	2012-07-12	2012-09-06	9.79 (2012-08-07)	最大值前 18 d	东西向异常条带, 震中位于滁河断 裂上异常一侧边 缘,异常形态与断 层走向一致
				2	2012-07-04	2012-08-15	2012-07-30	最大值前 10 d	
16	2012-07-20	5.2	江苏宝应县	1	2012-07-12	2012-09-06	14.07 (2012-08-07)	最大值前 18 d	东西向异常条带, 震中位于滁河断 裂上异常一侧边 缘,异常形态与断 层走向一致
				2	2012-07-04	2012-08-15	2012-07-30	最大值前 10 d	
17	2013-08-03	4.5	福建仙游县	2	2013-07-16	2013-09-20	9.48 (2013-08-27)	最大值前 23 d	团块状异常,震中 位于块状异常区 的东南边缘
18	2013-09-04	5.2	福建仙游县	1	2013-07-16	2013-09-22	10.25 (2013-08-27)	最大值后 7 d	团块状异常,震中 位于块状异常区 的东南边缘
				2	2013-07-16	2013-09-20	2013-08-27	最大值后 7 d	
19	2013-10-30	4.8	福建仙游县	4	2013-08-21	2013-09-20	9.57 (2013-09-11)	最大值后 50 d	团块状异常,震中 位于块状异常区 的东南边缘
20	2013-11-23	5.0	山东莱州市	3	2013-09-04	2013-11-07	6.81 (2013-09-24)	恢复后 15 d	北东向异常条带, 震中位于带状异 常区的边缘,异常 形态与断层走向 一致
21	2014-01-07	4.8	山东乳山市						无异常
22	2014-01-18	4.6	山东乳山市						无异常
23	2014-04-20	4.4	安徽霍山县						无异常
24	2014-09-23	4.5	浙江文成县	6	2014-08-12	2014-08-27	9.11 (2014-08-15)	最大值后 40 d	北西向异常条带, 震中位于带状异 常区的右下角边 缘,异常形态与断 层走向一致
25	2014-10-25	4.7	浙江文成县	6	2014-08-12	2014-08-27	9.11 (2014-08-15)	最大值后 70 d	北西向异常条带, 震中位于带状异 常区的右下角边 缘,异常形态与断 层走向一致

(转下表)

(接表2)

序号	发震时刻/年-月-日	震级/ M_L	地点	特征周期	开始时间/年-月-日	结束时间/年-月-日	最大峰值(时间)	发震时间	异常形态与断层关系
26	2015-01-18	4.4	河南范县	4	2014-09-12	2014-10-21	9.85 (2014-10-09)	最大值后 99 d	北东向异常条带,震中位于带状异常突出的北边缘,异常形态与断层走向一致
				5	2014-09-12	2014-10-12	(2014-09-30)	最大值后 108 d	
27	2015-03-14	4.8	安徽阜阳市					无异常	
28	2015-05-22	5.0	山东威海市					无异常	
29	2016-04-07	4.7	山西原平市					无异常	
30	2016-10-20	4.8	江苏射阳县	1	2016-07-29	2016-09-01	2016-08-24	最大值后 56 d	北东向异常条带,震中位于带状异常中间的断层上,异常形态与断层走向一致
				2	2016-07-01	2016-09-03	2016-07-25	最大值后 85 d	
				3	2016-09-30	2016-11-03	9.99 (2016-10-19)	最大值后 1 d	
31	2016-12-18	4.8	山西清徐县	2	2016-08-04	2016-09-29	9.61 (2016-08-26)	最大值后 112 d	近北东向异常条带,震中位于异常南侧边缘,异常形态与断层走向一致
32	2017-04-12	4.6	浙江临安市					无异常	
33	2019-12-26	5.3	湖北应城市					无异常	
34	2020-01-06	4.3	山西祁县	2	2019-08-28	2019-10-17	9.41 (2019-10-05)	最大值后 45 d	团块状异常,震中位于异常的东南边缘
35	2020-02-18	4.6	山东济南市 长清区	2	2019-11-07	2019-11-29	9.73 (2019-11-15)	最大值后 95 d	团块状异常,震中位于异常的东南边缘

所提取35个地震中,18个地震有明显的热红外异常,不同地震出现异常的特征周期不同,主要以前三个周期为主。出现异常的18个地震中,在前三个周期出现异常的地震有12个,前两个周期出现异常的地震有10个。异常持续时间最短为10 d,如2006年河南濮阳 M_L 4.7级地震;最长为86 d,如2010年河南太康 M_L 5.1级地震。10个5级地震中有6个震前出现异常,25个4级地震中有12个震前出现异常,地震大多发生在异常达到峰值后三个月内,对地震发生的时间有一定的预测意义。异常的

最大幅值与震级没有正相关的关系,有的幅值大的震级反而较小,所以从峰值方面对地震大小的判定存在困难。

3.2 讨论

以往的震例研究多是针对西部地区,而这些地方的地震都以大震或者巨震为主,对于东部及沿海地区,热红外方面的研究与应用少之又少。本文所得统计成果为东部地区地震热红外异常研究积累资料,具有一定的现实意义。文中所有震例的发震断

裂参数皆参考相关震源机制解参考文献,庆幸的是在一些中强地震发生前的确存在热异常现象,但热异常与地质环境和大气环境紧密相关,虽然前期数据预处理利用小波分析方法消除高频和低频的信息,但还是不能完全消除云雨和地球温度场的影响,且目前对于地震热红外异常的成因机理认识尚不成熟,将热红外用于地震预测,需要与其他前兆手段和测震学方法综合判定。另外沿海地区的热红外异常易受海洋气候的影响,整个地震异常是复杂的。本文取得的初结果,仅仅为东部地区的热红外研究积累一些初始经验,后续还需要大量震例不断的积累验证并总结。

致谢:甘肃省地震局张元生老师提供了计算程序,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Gomyi V I, Salman A G, Tronin A A, et al. The earth's outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. Proceedings of the Academy of Science of the USSR, 1988, 301(01):67-69.
- [2] 康春丽,韩延本,刘德富,等.强震前地气系统长波辐射(OLR)异常的成因[J].地球物理学进展,2008,23(6):1703-1708.
- [3] Pulinets S A, Ouzounov D, Karelin A V, et al. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31(4):143-153.
- [4] 强祖基,侯常恭,李玲芝,等.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(06):564-574.
- [5] 崔承禹,邓明德,耿乃光.在不同压力下岩石光谱辐射特性研究[J].科学通报,1993,38(6):538-541.
- [6] 耿乃光,崔承禹,邓明德.岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J].地震学报,1992(S1):645-652.
- [7] 邓志辉,王煜,陈梅花,等.中国大陆几次强地震活动的卫星红外异常分析[J].地震地质,2003,25(2):327-337.
- [8] 刘德富.台湾集集强震前的卫星遥感长波辐射场变异分析[J].地球信息科学,2000,2(1):33-36.
- [9] 张元生,柳钦火,郭晓.卫星热红外遥感在地震预报中的应用与研究进展[J].西北地震学报,2004,26(4):357-361.
- [10] 强祖基,孔令昌,王弋平,等.地球放气、热红外异常与地震活动[J].科学通报,1992,37(24):2259-2262.
- [11] 强祖基,孔令昌,郭满红,等.卫星热红外增温机制的实验研究[J].地震学报,1997(2):197-201.
- [12] 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.
- [13] 郭晓,张元生,钟美娇.卫星热红外遥感资料在地震预报中的应用研究[J].西北地震学报,2005,27(3):223-227.
- [14] 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法及震例分析[J].地球物理学报,2010,53(11):2688-2695.
- [15] 马宗晋.1966—1976年中国九大地震[M].北京:地震出版社,1982.
- [16] 刘德富,罗灼礼.强烈地震前的OLR异常现象[J].地震,1997,17(2):126-132.
- [17] 张元生,郭晓,钟美娇,等.汶川地震卫星热红外亮温变化[J].科学通报,2010,55(3):904-910.
- [18] 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):171-176.
- [19] 张璇,张元生,田洁,等.2016年3月21日甘肃金塔4.7级地震热红外亮温异常分析[J].地震工程学报,2016,38(S2):212-217.
- [20] 王莹,张元生,魏从信.云南几次中强地震热红外异常特征对比研究[J].影像科学与光化学,2019,37(3):215-226.