

基于甘肃积石山6.2级和日本能登7.6级地震前热红外现象的均线差值增强比法的异常提取能力分析

廖洪月, 钟美娇, 张永仙, 郭昱琴, 郑 怡

Anomaly extraction capability analysis based on the mean line difference enhancement ratio method for thermal infrared phenomena before the Jishishan $M_{6.2}$ earthquake in Gansu Province and Noto $M_{7.6}$ earthquake in Japan

Liao Hongyue, Zhong Meijiao, Zhang Yongxian, Guo Yuqin, and Zheng Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用均线差值振幅波动水平分析汶川、雅安芦山、九寨沟地震前热红外异常

Analysis of thermal infrared anomalies before Wenchuan, Yaan Lushan and Jiuzhaigou earthquakes by using amplitude fluctuation level of mean difference

地震科学进展. 2021(8): 352-361

甘肃景泰 $M_{4.7}$ 地震前芦阳水温异常分析

Analysis on water temperature anomalies at Luyang well before the Jingtai $M_{4.7}$ earthquake in Gansu Province

地震科学进展. 2018(5): 12-19

与汶川地震可能相关的震磁效应几个地磁站地磁Z分量小波变换后的“日变幅差”特征

Possible seismo-magnetic effect of the Wenchuan earthquake: Characteristics of “difference in daily amplitude” derived from the wavelet transform for the Z-components in geomagnetic observatories

地震科学进展. 2018(4): 95-97

2016年10月17日青海杂多6.2级地震热红外异常特征分析

Analysis of thermal infrared anomaly characteristics in Qinghai Zadoi $M_{6.2}$ earthquake on October 17, 2016

地震科学进展. 2019(8): 154-155

剑河 $M_{5.5}$ 地震前地磁异常特征分析

Analysis of geomagnetic anomalies before the Jianhe $M_{5.5}$ earthquake

地震科学进展. 2020(5): 12-17

日本仪器烈度计算3种方法对比

Comparison of instrument intensities using three different methods of Japan

地震科学进展. 2020(8): 20-24



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

廖洪月, 钟美娇, 张永仙, 等. 基于甘肃积石山 6.2 级和日本能登 7.6 级地震前热红外现象的均线差值增强比法的异常提取能力分析[J]. 地震科学进展, 2024, 54(7): 440-449. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-018

Liao H Y, Zhong M J, Zhang Y X, et al. Anomaly extraction capability analysis based on the mean line difference enhancement ratio method for thermal infrared phenomena before the Jishishan M6.2 earthquake in Gansu Province and Noto M7.6 earthquake in Japan[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(7): 440-449. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-018

积石山地震专题

基于甘肃积石山 6.2 级和日本能登 7.6 级地震前 热红外现象的均线差值增强比法的异常 提取能力分析

廖洪月¹⁾ 钟美娇^{2)*} 张永仙³⁾ 郭昱琴⁴⁾ 郑 怡⁵⁾

- 1) 西安市地震局, 陕西西安 710018
- 2) 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃兰州 730030
- 3) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036
- 4) 海南省地震局, 海南海口 570100
- 5) 陕西省地震局, 陕西西安 710068

摘要 2023 年 12 月 18 日甘肃省积石山县发生 6.2 级、2024 年 1 月 1 日日本能登发生 7.6 级地震, 两次地震间隔时间较短, 均造成较多的人员伤亡和巨大的财产损失, 引起地震界的高度关注。运用均线差值振幅增强比法分析发现, 这两次地震前均存在显著热红外异常: 积石山地震前约 110~90 天, 长波辐射热红外活跃性水平高于历史平均水平 1.5~5 倍; 日本能登地震前约 140~100 天, 热红外活跃性水平高于历史平均水平 3~4 倍。以上现象再次证明了强震前存在热红外异常现象, 也从侧面说明了均线差值振幅增强比法具有较强的热红外异常提取能力。

关键词 甘肃积石山地震; 日本能登地震; 均线差值振幅增强比法; 热红外

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)07-0440-10

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-018

Anomaly extraction capability analysis based on the mean line difference enhancement ratio method for thermal infrared phenomena before the Jishishan M6.2 earthquake in Gansu Province and Noto M7.6 earthquake in Japan

Liao Hongyue¹⁾, Zhong Meijiao^{2)*}, Zhang Yongxian³⁾, Guo Yuqin⁴⁾, Zheng Yi⁵⁾

1) Xi'an Earthquake Agency, Shaanxi Xi'an 710018, China

收稿日期: 2024-02-13; 采用日期: 2024-04-16。

第一作者: 廖洪月(1970-), 男, 工程师, 主要从事 TEC、热红外及大数据与地震关系等方面的研究。E-mail: liao_700424@163.com。

* 通信作者: 钟美娇(1981-), 女, 高级工程师, 主要从事地震热红外遥感应用研究。E-mail: 120238662@qq.com。



- 2) Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Gansu Lanzhou 730030, China
- 3) Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China
- 4) Hainan Earthquake Agency, Hainan Haikou 570100, China
- 5) Shaanxi Earthquake Agency, Shaanxi Xi'an 710068, China

Abstract On December 18, 2023, a $M6.2$ earthquake occurred in Jishishan County of Gansu Province, and on January 1, 2024, a $M7.6$ earthquake occurred in Noto, Japan, with a short interval between the two earthquakes. They caused a large number of deaths and huge property losses with causing great concern in the seismic community. By using the mean line difference amplitude enhancement ratio method, it was found that there were significant thermal infrared anomalies before the two earthquakes. About 110 to 90 days before the Jishishan earthquake, the activity of long-wave radiant thermal infrared was 1.5 to 5 times higher than the historical average. Thermal infrared activity levels were 3 to 4 times higher than the historical average for about 140 to 100 days before the Noto earthquake in Japan. These results once again prove that there are thermal infrared anomalies before strong earthquakes, and also indicate that the mean line difference amplitude enhancement ratio method has strong ability to extract thermal infrared anomalies.

Keywords Jishishan earthquake in Gansu Province; Noto earthquake in Japan; the mean line difference amplitude enhancement ratio method; thermal infrared

0 引言

卫星遥感观测数据较地面观测数据具有抗干扰强、观测范围广、测点分布均匀等优点, 众多学者利用遥感数据探索研究地震前兆取得丰硕成果^[1-4]。康春丽等^[5]以 NOAA 卫星的长波辐射 (Outgoing Long Radiation, OLR) 数据和日本静止气象卫星的 GMS-5 亮度温度数据为基础, 分析了 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震前后的热红外变化特征, 结果显示在震前 1 个月 OLR 出现增温异常, 震前 1 周亮度温度出现异常。2023 年 12 月 18 日甘肃积石山发生 6.2 级地震 (35.7°N, 102.79°E), 2024 年 1 月 1 日日本能登发生 7.6 级地震 (37.5°N, 137.2°E), 两次地震间隔 13 天, 震级相差 1.4 级, 纬度相近, 经度相差约 35°。运用热红外均线差值振幅增强比法以 NOAA 卫星的长波辐射数据为基础分析这两次地震, 发现震前均存在显著异常。尤其是, 日本能登地震前约 140~100 天, 震中及附近较大范围区域内均出现了强烈的热红外升温现象, 从热红外异常角度分析, 日本能登 7.6 级地震并不是“黑天鹅”事件, 而可能是一次“灰犀牛”事件^[6]。

均线差值振幅增强比法对热红外持续性微弱升温异常捕捉效果较好, 震例研究表明, 6 级以上浅层陆地和近海破坏性地震, 均存在不同形式和强度的震前异常。为介绍本方法, 作者并未刻意从历史震例中挑选个别典型震例进行分析证明, 而是选择了不同地域、发震时间间隔较短、不同级别、且当前社会

关注度较高的两次地震进行现象剖析, 希望与同行一起讨论本方法的优缺点及积石山 6.2 级、日本能登 7.6 级两次地震前的热红外现象。

1 数据和方法

采用美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 官方全球热红外长波辐射 (OLR) 数据, 数据下载地址 https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CBO_V1/。数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 每个网格每天 1 个数据, 数据通常滞后 2 天。

热红外数据的处理分析, 采用作者研发的均线差值振幅增强比法, 该方法数学公式和数据处理流程为:

$$A_i = \sum_{t=i-365}^i D_t \quad (1)$$

$$\Delta B_i = A_i - A_{i-t} \quad i > t \quad (2)$$

$$\Delta T_i = \Delta B_i - \Delta B_{\min} \quad (3)$$

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_{i=1}^i \Delta T_i}{i} \quad (i \geq 1) \quad (4)$$

$$Y_i = \left[\frac{(\Delta T_i - \bar{T}_i)}{\bar{T}_i} \right]^3 \text{ 或 } Y_i = \frac{(\Delta T_i - \bar{T}_i)}{\bar{T}_i} \quad (5)$$

各公式作用如下: 公式(1)计算当天长波热红外年均值; 公式(2)计算年均线差值; 公式(3)计算当天

差值振幅;公式(4)计算历史差值平均振幅;公式(5)计算异常值(热红外活跃指数),即当天的差值振幅值与平均振幅值之差,再与平均振幅值相比,得到差值振幅增强倍数。公式详细解释请参阅文献[7-8]。本方法最低异常标准值设定为1.618。

当前学术界热红外分析主要方法为功率谱法、小波法、距平法等。相对于以上方法,本方法具有以下3个特点:①数据处理时无需去云,可产出以天为单位连续的数据产品。由于滑动年均值是一个包含春夏秋冬4个季节较大时间尺度的参数,每组年均线数据包含的云数据信息可视为一个相同或相近值,亦可视之为背景值。在此基础上做年均线差值分析,差值时云数据全部或绝大部分被对冲掉,故无需做去云技术处理,最终提取的异常结果并不劣于甚至优于其他方法。②可以发现持续的微弱热红外升温异常。年均线差值可以提取出1年或指定时间长度内微弱热红外上升量值的总和,微弱异常在本方法处理下,经累积演变为显著异常。③可提前发现异常。众多研究文献表明,临震前通常会发生显著热红外异常^[9-13],在此之前,也可能会发生持续性且容易被忽视的微弱异常,本方法可以提前捕捉到该类异常。

本方法设置了两种差值时间:长周期(365天)和短周期(40天,可调节),长周期代表1年内的变化影响,短周期代表40天内的变化影响。长短周期适应性有所区别,长周期提取持续时间长的微弱异常优于短周期,而短周期提取相对强烈异常优于长周期,两者各有所长,互为补充。长周期也可提取持续的强烈异常,但短周期提取持续弱异常能力远低于长周期。长周期异常包含1整年的异常变化信息,通常可代表大环境异常或背景异常,短周期异常可代表显著异常。两者可能同步出现,短周期异常的可靠性通常建立在长周期异常存在的基础上,长周期异常级别应高于短周期异常。

本方法的差值分析狭义上为1年差值分析,即指定时间段内数据与上1年度相同时段数据的滑动差值分析。为提高异常的可靠性及深度异常挖掘,本方法增加了3年、5年综合差值分析,方法为指定时间段内数据与前3年、前5年内每年相同时段数据进行差值分析,取异常平均值。3种异常值均为相对异常,由于参照对象不同,其物理意义有所区别,历史参照对象均假定是正常状态,理论上,如果出现持续强烈热红外上升异常,3种异常时间曲线的趋势形态应是相似的。实际情况并非如此。假设强震前必定

出现热红外异常,在强震多发地区,其热红外正常状态与非正常状态交替出现,正常状态存续时间较短(小于两次强震间隔时间),非正常状态数据在差值分析中可能对冲现有异常数据,从而屏蔽异常。类似情形下,与较近的历史数据对比分析可更好地发现异常。如泛青海地区,该区域震例表明1年差值分析提取异常效果最佳,而3年、5年综合差值分析效果可能不如前者甚至提取不到异常。地震少发地区,强震前连续正常状态时间可能很长,1年差值、3年和5年综合差值分析通常均可同时提取到异常,3种时间异常曲线的趋势形态相似性概率高于强震多发地区。但理论上参考的历史数据时间越长,参照对象越多,提取的异常结果越可靠。

2 甘肃积石山6.2级地震和日本能登7.6级地震异常分析

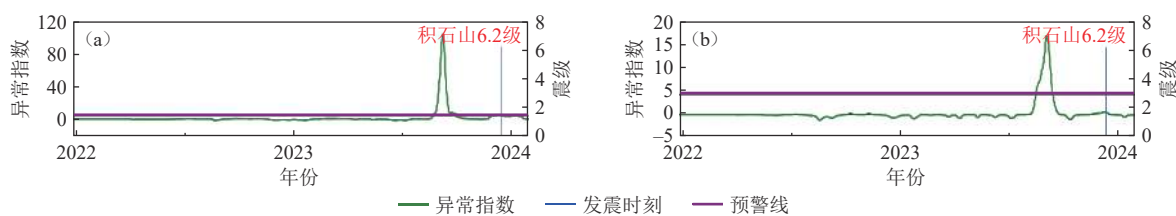
分别运用时间曲线和空间平面图阐述两次地震前异常发展过程及特征。时间曲线图左纵轴为异常放大指数,放大方法为在原异常值基础上立方运算,预警线由1.618同步放大至4.235。异常放大的目的是为了拉大正常值与异常值的差距,提高异常时段在整个时间曲线中的显示度。右纵轴为以当前网格为中心半径100 km内发生的6级以上地震震级,横轴为时间。平面影像由SURFER绘图工具绘制空间热红外活跃指数(异常指数)等线图,横坐标为经度,纵轴为纬度。

2.1 甘肃积石山6.2级地震

据中国地震台网正式测定,北京时间2023年12月18日23时59分在甘肃积石山发生6.2级地震,震源深度10 km,震中位于(35.7°N, 102.79°E)。此次地震发生在拉基山北缘断裂带东支。拉脊山断裂带地处中国南北地震带的北部,是青藏高原东北缘的一个重要组成区域,该地区由于青藏高原的隆起,加上欧亚板块与印度板块的长期挤压作用,是我国构造变形和地震活动最为强烈的地区之一^[14-15]。

2.1.1 时间异常分析

首先分析1年差值异常。以积石山6.2级地震震中所在网格(35.5°N, 102.5°E)为中心提取其1年差值时间异常曲线(图1),曲线清晰显示长周期和短周期异常峰值发生时间非常接近,长周期为2023年9月9日,距离发震时间间隔100天,短周期为9月8日。长周期峰值为4.7倍,即当日热红外年活跃度高于历史平均水平4.7倍。短期异常活跃度高于历史平均



(a) 长周期(365 天)差值异常; (b) 短周期(40 天)差值异常
(a) The long period (365 days); (b) The short period (40 days)

图 1 震中地区 1 年差值异常分析图

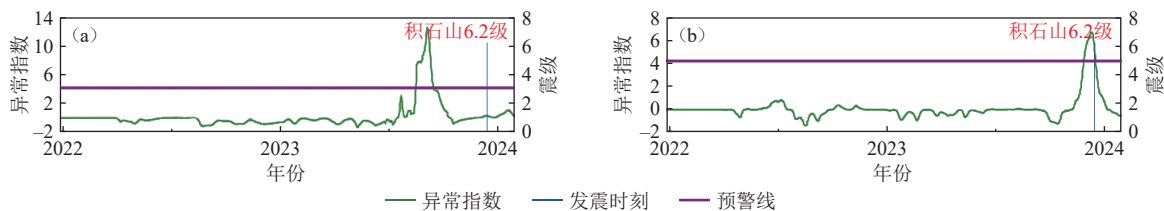
Fig. 1 Analysis chart of one-year difference anomaly in the epicenter area

的 2.6 倍。表明 2023 年 8 月底—9 月中上旬这段时间较上 1 年同期出现显著的热红外升温异常。

经分析对比, 3 年和 5 年综合异常结果大同小异。以 5 年综合差值异常分析为例(图 2), 其短周期

异常峰值出现在震前 7 天, 峰值倍数 1.9, 长周期峰值出现在震前 101 天。

1 年、3 年、5 年差值 3 种模式分析综合统计结果如表 1。



(a) 长周期(365 天)差值异常; (b) 短周期(40 天)差值异常
(a) The long period (365 days); (b) The short period (40 days)

图 2 震中区域 5 年综合差值异常分析图

Fig. 2 Analysis chart of 5-year comprehensive difference anomalies in the epicenter area

表 1 积石山地震差值异常分析表

Table 1 Analysis table of difference anomaly in Jishishan earthquake

差值类型	长周期异常			短周期异常		
	峰值时间	最大峰值/倍	异常发展时间	峰值时间	最大峰值/倍	异常发展时间
1年	距发震100天	4.7	约30天	距发震101天	2.6	约40天
3年	距发震101天	3.3	约55天	距发震5天	1.5	约35天
5年	距发震101天	2.4	约50天	距发震7天	1.9	约50天

分析表 1 发现: 在 3 种状态下, 长周期异常峰值时间几乎相同, 均发生于震前约 100 天, 表明在 2023 年 9 月 10 日前后, 震中及附近区域发生了持续性的升温异常。3 年、5 年综合异常时间曲线短周期趋势形态与 1 年差值不一致, 前两者短周期异常峰值分别出现在震前 5 天、7 天, 而 1 年差值异常则出现在震前约 100 天。该异常现象表明, 与上 1 年数据比较, 积石山地震前 100 天异常最强烈。而与震前 3 年、5 年数据差值比较取异常均值, 则震前 5 天、7 天热红外短临异常最强烈, 可视为积石山地震临震异常。

表 1 显示, 异常持续时间较长, 为 30~60 天, 不容易错过或漏过, 为提前发现地震异常创造了良好的条件。

时间曲线分析表明, 积石山 6.2 级地震前两年内, 至少在两个时间段出现过热红外上升异常, 分别在 2023 年 9 月 10 日前后及临震前 2023 年 12 月 10 日前后。

2.1.2 平面异常分析

运用平面法分析积石山地震前热红外异常范围和面积等特征, 由于 1 年、3 年、5 年 3 种模式最终结果相近, 由于篇幅所限, 本文仅对 1 年差值和 5 年综合差值平面异常进行分析。

1年差值长周期平面异常分析: 在长周期峰值2023年9月9日当天, 在(34°N~43°N, 86°E~108°E)区域出现大范围异常, 大环境异常明显。震中位于异

常区内, 且位于异常区的最高值区域(图3)。说明震前100天前后震中区域可能受挤压影响最严重, 导致相对升温最高。

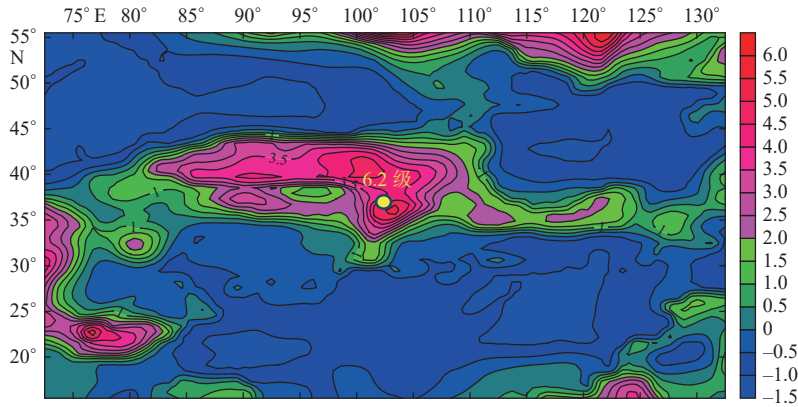


图3 1年差值长周期异常峰值平面图

Fig. 3 Plan of one-year difference abnormal peak values in long period

1年差值短周期平面异常分析(图4): 尽管短周期异常数据峰值时间与长周期异常峰值时间几乎相同, 相对于长周期异常平面图, 短周期异常平面图

内异常范围成倍缩小, 震中仍位于异常最高值区域, 同样说明, 震前震中所在区域可能受挤压影响最严重。

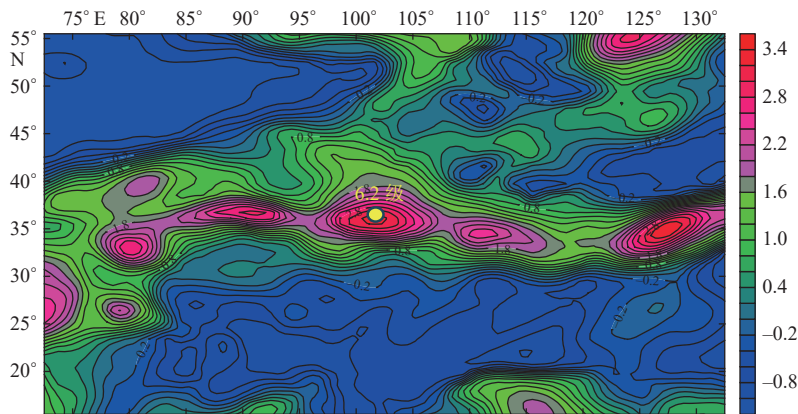


图4 1年差值短周期异常峰值平面图

Fig. 4 Plan of one-year difference abnormal peak values in short period

利用交叉方法将以上两图进行合并, 得到该时间公共异常区域。交叉原理为: 将两图相同位置的每个网格异常数据进行对比, 取其最小值。也就是说, 如果其中之一不为异常, 则认为该网格为正常状态。如果异常值均大于 1.618, 则取最小异常值, 最终得到新的平面图数据, 平面图内异常区域长短周期公共异常区域(图5)。交叉后平面图显示, 其异常范围再次缩小, 震中仍位于异常最高区域且位于主要异常区中央区域。该结果表明, 长短周期平面图的交叉分析处理, 可以过滤大部分区域的伪

异常。

利用同样方法与流程得到5年综合差值分析长短周期峰值交叉异常平面图(图6)。显示公共异常区相对较小, 震中位于异常区中央区域。

1年及5年差值两种不同模式下产出的平面交叉图, 均能较好地将实际震中与异常区域结合, 整个平面中异常区域数量较少, 且震中与异常区域中心、异常高值区十分接近。以上特征在热红外前兆异常实际分析中, 对于未来震中预测范围的圈定具有现实指导意义。

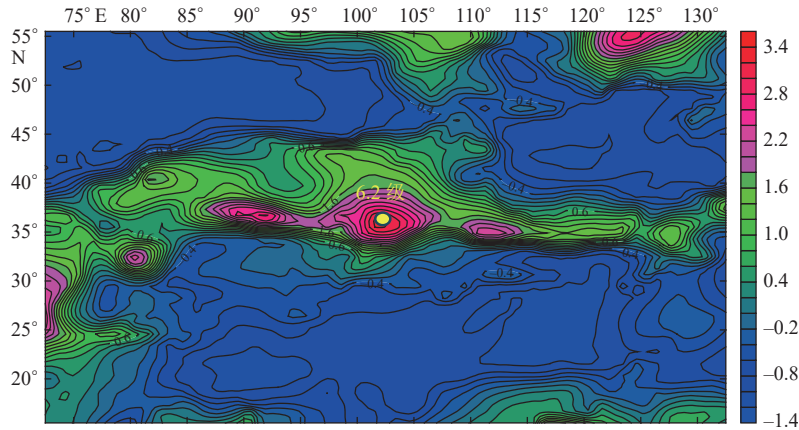


图 5 1 年差值长短周期异常交叉平面图

Fig. 5 Cross plan of one-year difference anomalies in long and short period

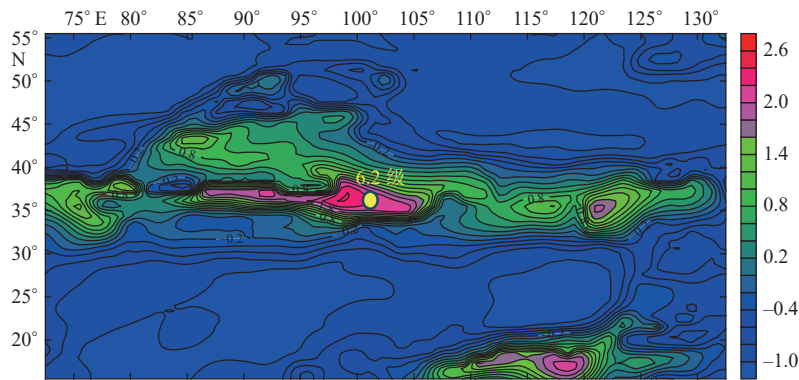


图 6 5 年综合差值长短周期异常交叉平面图

Fig. 6 Cross plan of 5-year comprehensive difference anomalies in long and short period

2.2 日本能登 7.6 级地震

日本能登半岛 7.6 级地震 (37.5°N, 137.2°E) 发生在当地时间 2024 年 1 月 1 日 16:10, 震中位于石川县凤珠郡穴水町东北方 16 km 处, 震源深度为 16 km。据研究, 本次地震的震源机制、断层分布和余震情况, 显示此次地震为明显的逆冲型破裂, 余震呈现 NE 向带状分布, 长度约 150 km, 并且余震条带北侧的断层向南倾斜、东南侧断层则向 NW 向倾斜。据日本气象厅给出的研究区域的 GNSS 观测同震位移结果, 显示能登半岛地区的同震位移方向以 W-NW 向为主, 稍远距离同震以 NW 向为主^[16]。

2.2.1 时间异常分析

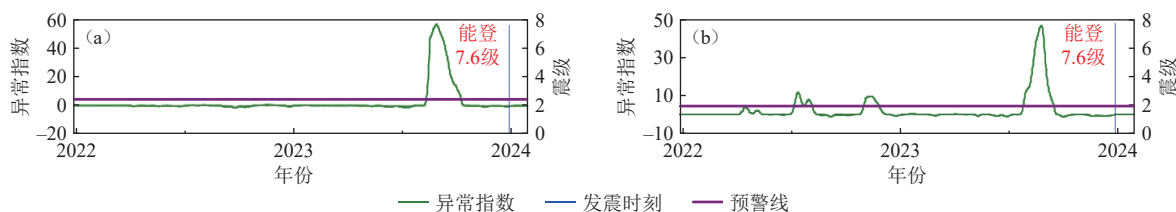
参照积石山地震的分析方法和流程, 分析日本能登 7.6 级地震。在能登地震震中 (37.5°N, 137.2°E) 及附近网格均可提取到震前高强度异常曲线, 且 1 年、3 年、5 年差值时间异常曲线趋势形态十分相似。与积石山地震比较, 日本能登 7.6 级地震前没有出现 2 次短临地震异常现象。由于 3 种曲线的趋势

十分相似, 本文仅对 3 年综合差值异常曲线和平面图进行分析。

能登地震震中 3 年综合差值时间曲线 (图 7) 显示: 长周期异常峰值发生于 2023 年 9 月 1 日, 距发震间隔 122 天, 短周期异常峰值发生于 2023 年 8 月 30 日, 距离发震时间 124 天, 两者异常发生时间高度重叠, 异常同步特征明显, 说明 40 天内产生的升温总量积极影响年内升温总量, 影响权重非常高。长周期峰值倍数为 3.8, 短周期为 3.6。表明地震前 120 天前后震中及附近区域热红外长短周期异常活跃度高于历史平均水平接近 3~4 倍。

日本能登地震 1 年、3 年、5 年差值 3 种模式分析综合统计结果如表 2。

能登地震震级比积石山地震震级高 1.4。表 2 显示, 能登地震前 3 种差值热红外异常峰值集中于 110~130 天之间, 异常发展时间长约 40~60 天, 长于积石山地震, 异常峰值也就是最大异常强度也普遍高于积石山地震。



(a) 长周期(365天)差值异常; (b) 短周期(40天)差值异常

(a) The long period (365 days); (b) The short period (40 days)

图7 能登地震震中区域3年综合差值异常分析图

Fig. 7 Analysis chart of 5-year comprehensive difference anomalies in the epicenter area of Noto earthquake

表2 能登地震差值异常分析表

Table 2 Analysis table of difference anomaly in Noto earthquake

差值类型	长周期异常			短周期异常		
	峰值时间	最大峰值/倍	异常发展时间	峰值时间	最大峰值/倍	异常发展时间
1年	距发震112天	4.2	约60天	距发震127天	3.8	约40天
3年	距发震122天	3.8	约60天	距发震124天	3.6	约55天
5年	距发震118天	3.9	约63天	距发震123天	2.9	约55天

2.2.2 平面异常分析

研究分析表明,3种差值模式的平面分析最终结果相似,现以3年综合差值为例进行分析。由于可能受大震前板块间相互挤压影响,长周期峰值时间2023年9月1日当天平面图显示,在(35°N~45°N, 130°E~150°E)出现了条状大范围异常,主异常区方向为北东方向,震中北部55°N区域,也出现了大面积异常。整个平面大环境背景异常十分明显(图8)。震中位于异常区中部稍偏西2°~3°。说明相对于前3年,该区域热红外升温明显。由于长周期代表过去1年内的变化总影响,因此平面图反映的并不是当天热红外的实时异常,因此出现大面积异常可以理解 and 接受。

3年综合差值短周期分析震中附近异常也呈条状(图9),形态与长周期平面图相似。短周期峰值时间为2023年8月30日,早于长周期3天,尽管异常数据时间非常接近,相对于长周期异常,短周期异常平面图北面只存在小范围异常区,其异常总面积明显缩小,震中位于异常核心偏北约1°~2°,同样说明震前120天前后震中及所在东南区域热红外升温明显。相对于长周期(365天),短周期40天内的变化影响产生异常的面积明显小于长周期,且没有在长周期的异常主体轮廓外产生新的大异常区,符合逻辑。

与积石山地震平面分析结果特征相似,将长短周期峰值异常数据交叉处理后,新的平面图内异常区

总面积、异常区域数量再次缩小,震中也非常接近于异常核心区域(图10),异常区总体呈条状,其长轴方向与USGS官网公布的烈度图长轴方向近似(图11)。

3 讨论与结论

利用均线差值振幅增强法提取热红外异常,其首要优点是不需考虑去云,数据处理流程简单高效,产出的连续异常数据可以分析空间持续的变化过程。3种差值模式分析得到异常结果可相互佐证,提高了异常的可靠性,也可挖掘更多异常。缺点是异常面积有时非常大,尤其是长周期异常的这方面特征更加明显,对未来发震区域的圈定带来困难。但通过长短周期平面数据交叉技术处理,可缩小异常区域范围,减小震中位置偏离度。

通过包括积石山地震、能登地震等的震例分析,震前异常有如下特征:

(1)6级以上的大陆或近海浅层地震前通常会呈现长短周期异常。短周期异常出现频次通常高于长周期,长周期异常可靠性高于短周期。

(2)震级越大,长短周期异常同步或准同步现象概率越高。

(3)理论上,3年综合差值异常可靠性高于1年差值异常,5年综合差值异常可靠性高于3年综合差值异常。但在强震多发区,通常1年差值异常可靠性最高。

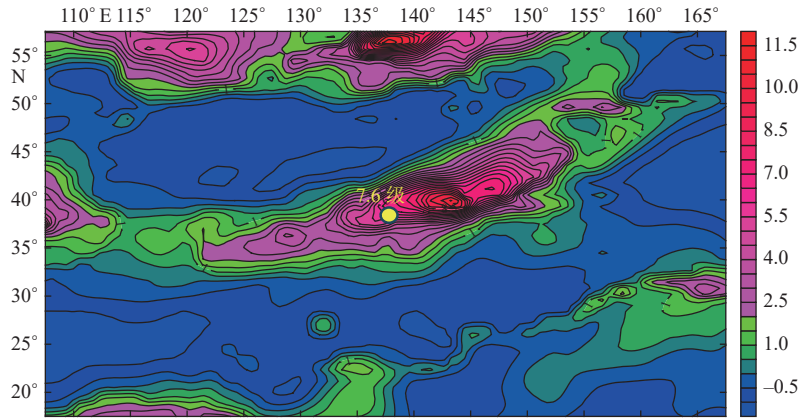


图 8 3 年综合差值长周期异常峰值平面图

Fig. 8 Plan of 3-year comprehensive difference abnormal peak values in long period

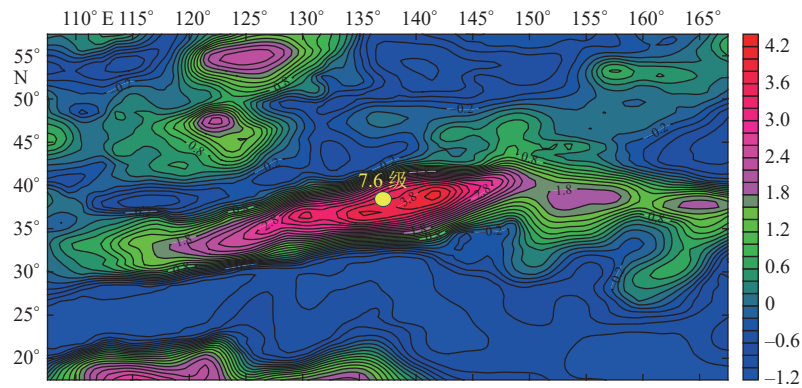


图 9 3 年综合差值短周期异常峰值平面图

Fig. 9 Plan of 3-year comprehensive difference abnormal peak values in short period

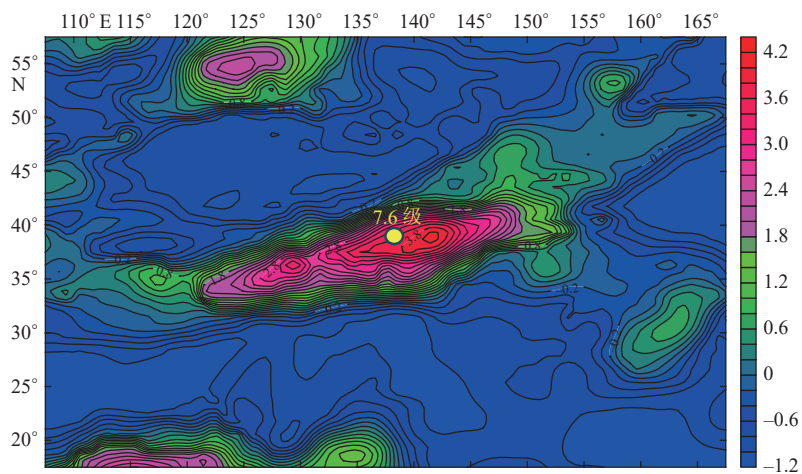


图 10 3 年综合差值长短周期异常交叉平面图

Fig. 10 Cross plan of 3-year comprehensive difference anomalies in long and short period

(4) 由于强震前地块间加速挤压运动的不确定性，震前可能出现 1 次以上的异常，如果出现 2 次异常，强震发生在第 2 次异常发展期内或距离第 2 次

异常较近时间的概率较高，该异常可视为临震异常。只出现 1 次显著异常时，发震时间距离异常峰值为几天到几个月不等，通常不超过 1 年。

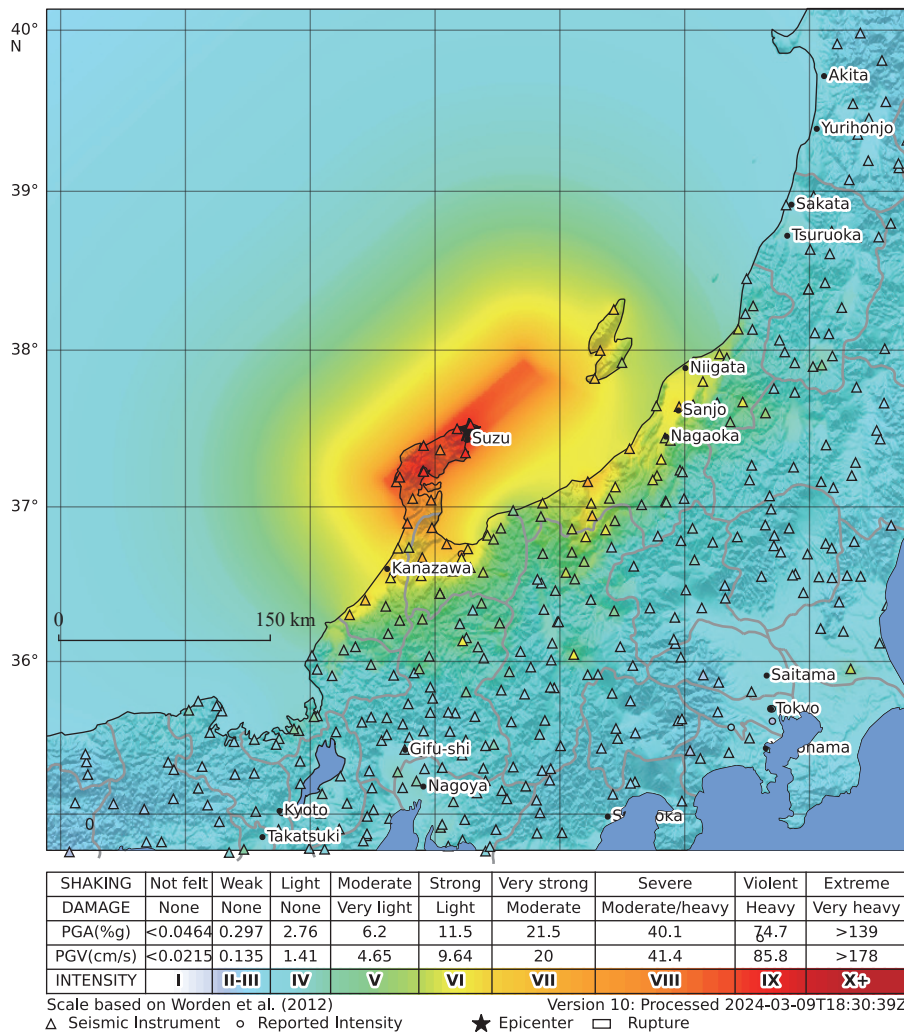


图 11 USGS 官网能登地震烈度图

Fig. 11 Intensity map of Noto earthquake in the official website of USGS

由于方法原理及分析数据对象时间尺度的不同(本方法研究的基础数据对象为年均线,主要是年均线基础上的年差值及 40 天差值异常,其时间尺度大于同行),所提取的异常性质、内涵与其他方法存在差异,本方法所提取异常的出现时间可能早于其他方法,单日实时监测数据显著异常本方法可能无法发现,因此,认为相同震例异常分析结果与同行有所偏差为正常现象。

虽然本方法能提取到强震前显著的疑似地震异常,不可否认,该方法本身还存在某些局限性,如异常总数量大于地震数量、异常强度与震级水平非正

比关系导致震级难以预测、异常面积大、震中位置难以精准定位等缺点,需通过更多地震案例整理研究、引用高分辨率数据源、改进异常指标、利用其他监测手段辅助综合分析等,逐步加以改进,并在同行专家协助指导下,不断升级完善。

致谢

甘肃省地震局张元生研究员、江苏省地震局冯志生研究员及中国地震局第二监测中心季灵运研究员在本方法研究过程中提供了指导和支持,对本文的完成起了推动作用,在此表示感谢。

参考文献

[1] Qin K, Wu L X, Zheng S, et al. Discriminating satellite IR anomalies associated with the $M_{5.7}$ Yushu earthquake in China[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(5): 1324-1331

- [2] 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
Wang Y, Zhang Y S, Wei C X. Comparative study on thermal infrared anomaly characteristics of several moderate and strong earthquakes in Yunnan Province[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2019, 37(3): 215-226
- [3] 张璇, 张元生, 郭晓, 等. 尼泊尔 8.1 级地震卫星热红外异常解析[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 227-233
Zhang X, Zhang Y S, Guo X, et al. Analysis of thermal infrared anomaly in the Nepal M_s 8.1 earthquake[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 227-233
- [4] Zhong M J, Shan X J, Zhang X M, et al. Thermal infrared and ionospheric anomalies of the 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou earthquake[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2843
- [5] 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 等. 昆仑山口西 8.1 级地震的卫星热红外前兆特征分析[J]. 西北地震学报, 2003, 25(1): 12-15
Kang C L, Chen Z W, Chen L Z, et al. Analysis on the satellite infrared anomaly feature before west to Kunlun mountain pass M 8.1 earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, 25(1): 12-15
- [6] 刘月, 吴忠良, 张永仙. 2024 年 1 月 1 日能登半岛 M_w 7.5 地作为一个可能的“龙王”事件[J]. 地球与行星物理评论(中英文), 2024, 55(4): 493-499
Liu Y, Wu Z L, Zhang Y X. The January 1, 2024, Noto Peninsula, Japan, M_w 7.5 earthquake as a plausible ‘Dragon King’ event[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, 55(4): 493-499
- [7] 廖洪月, 董娜, 王刚. 利用均线差值振幅波动水平分析汶川、雅安芦山、九寨沟地震前热红外异常[J]. 地震科学进展, 2021, 51(8): 352-361
Liao H Y, Dong N, Wang G. Analysis of thermal infrared anomalies before Wenchuan, Yaan Lushan and Jiuzhaigou earthquakes by using amplitude fluctuation level of mean difference[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2021, 51(8): 352-361
- [8] 唐好丛, 廖洪月, 吴佳, 等. 2023 年 2 月 6 日土耳其两次强震前卫星热红外及 TEC 趋势异常分析[J]. 地震科学进展, 2023, 53(10): 449-461
Tang H C, Liao H Y, Wu J, et al. Anomaly trend analysis of satellite thermal infrared and TEC before two strong earthquakes in Turkey on February 6, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2023, 53(10): 449-461
- [9] 郭卫英, 单新建, 屈春燕. 塔里木盆地红外增温现象与地震关系的初步探讨[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 736-741
Guo W Y, Shan X J, Qu C Y. Correlation between infrared anomalous and earthquakes in Tarim basin[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 736-741
- [10] 李青梅, 张元生, 吕俊强, 等. 2014 年 10 月 7 日云南景谷 M_s 6.6 地震热红外异常[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1007-1012
Li Q M, Zhang Y S, Lü J Q, et al. Thermal infrared anomaly occurring before the Jinggu, Yunnan M_s 6.6 earthquake on October 7, 2014[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(4): 1007-1012
- [11] 刘德富, 彭克银, 刘维贺, 等. 地震有“热征兆”[J]. 地震学报, 1999, 21(6): 652-656
Liu D F, Peng K Y, Liu W H, et al. Thermal omens before earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, 21(6): 652-656
- [12] 马瑾, 陈顺云, 扈小燕, 等. 大陆地表温度场的时空变化与现今构造活动[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 1-14
Ma J, Chen S Y, Hu X Y, et al. Spatial-temporal variation of the land surface temperature field and present-day tectonic activity[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 1-14
- [13] 强祖基, 徐秀登, 赁常恭. 卫星热红外异常: 临震前兆[J]. 科学通报, 1990, 35(17): 1324-1327
Qiang Z J, Xu X D, Lin C G. Satellite thermal infrared anomaly: Precursor to impending earthquakes[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(17): 1324-1327
- [14] 郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源参数和破裂特征[J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 75-85
Guo X Y, Han L B, Zhang X, et al. Source parameters and rupture characteristics of the M 6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 75-85
- [15] 陆诗铭, 吴中海, 李智超. 2023 年 12 月 18 日甘肃省积石山 6.2 级地震的控震构造及特征[J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 86-93
Lu S M, Wu Z H, Li Z C. Seismic structure characteristics of the 18 December 2023 M 6.2 Jishishan earthquake, Gansu Province[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 86-93
- [16] 陈光齐, 武艳强, 夏明垚, 等. 2024 年 1 月 1 日日本能登半岛 7.6 级地震: 震源特征、灾害概况与应急响应[J]. 地震, 2024, 44(1): 141-152
Chen G Q, Wu Y Q, Xia M Y, et al. The Japan Noto peninsula M 7.6 earthquake on January 1, 2024: Focal characteristics, disaster situation and emergency response[J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 141-152