

卢显,孟庆岩,张晓东,等,2022. 西藏地区地震前后地面温度特征提取分析. 中国地震,38(3):464~471.

# 西藏地区地震前后地面温度特征提取分析

卢显<sup>1)</sup> 孟庆岩<sup>2)</sup> 张晓东<sup>3)</sup> 刘杰<sup>1)</sup> 任静<sup>1)</sup>

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094

3) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

**摘要** 基于我国气象站气温数据和美国国家环境预测中心地表温度数据,对西藏地区 2010 年 1 月—2014 年 12 月的 15 次  $M_s \geq 5.0$  以上地震开展地面温度数据的变化提取研究。计算结果显示,12 次地震前出现了气温增强现象,13 次地震前出现了地表温度增温异常,在震前同时出现两种温度结果增值现象的地震有 10 次,且两者的温度峰值日期非常接近,相互印证了西藏地区中强以上地震前存在地面温度增强的现象。

**关键词:** 西藏地区 地震 地面温度 气象站 NCEP

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0464-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

中国是全球内陆地震最为严重的国家之一,地震活动强度大、频度高、分布广,加快地震科学研究至关重要。印度与欧亚大陆的相互碰撞挤压形成了世界上海拔最高的喜马拉雅造山带(邓起东等,2002; Yin et al,2000; Ding et al,2005; 李国辉等,2020),此处的西藏地区由多条规模不等、东西走向的弧-弧、弧-陆碰撞结合带和其间的岛弧或陆块拼贴而成(张燕等,2013),且该地区地震较为频发。发生在西藏的中强地震多位于地震基本烈度高值区域,且灾区属于高寒、贫困山区,经济条件差,民房以石木或土木结构为主,抗震性能差。例如 2008 年 10 月 6 日拉萨当雄 6.6 级地震造成 10 人死亡,14 人重伤,直接经济损失达 41137 万元(巴桑次仁等,2009)。因此,针对西藏地区开展地震监测预测研究具有重要的意义。

关于地震活动与地面温度变化的相关研究已经开展较多。通过对 NOAA 卫星热红外亮温与野外安装气象观测站接收的数据进行分析,结果显示卫星热红外亮温受天气、云层等因素变化影响,曲线呈现高频突跳特征,亮温、气温及 0.2m 地温三者之间呈现较好的相关性(闫丽莉等,2012)。马瑾等(2000)通过研究 1997 年玛尼 7.9 级地震前后周围地区地温场的动态演化,发现在震前 20 天的阿尔金断裂东段出现增温现象,且逐渐扩散形成明显的条带,直到 11 月 8 日玛尼强震发生后,条带逐渐消失。大气温度和长波辐射也多次在中强地震前

[收稿日期] 2022-02-07 [修定日期] 2022-02-28

[项目类别] 国家自然科学基金青年基金(41704062)、中国地震局震情跟踪课题(2021010509)共同资助

[作者简介] 卢显,女,1985 年生,博士,高级工程师,主要从事地震监测预报和卫星遥感应用研究。

E-mail: luxian2010@seis.ac.cn

出现平静—增强—高峰—衰减的时空演变规律(马未宇等,2006、2020)。陈顺云等(2013b)以 MODIS 卫星的地表温度为基础,探索了汶川地震的同震热响应。针对 2012 年 8 月 11 日伊朗东阿塞拜疆省  $M_w$ 6.4 和  $M_w$ 6.3 地震,利用 MODIS 地表温度数据进行异常提取,结果显示地表温度在 2012 年 8 月 2 日出现大幅上升现象(Mohamed et al,2021)。利用美国 NCEP 多层温度数据对 2014 年云南鲁甸  $M_w$ 6.2 地震前后的温度变化进行计算分析,震前同样在震中附近地表出现了温度升高的现象(Zhang et al,2021)。张铁宝等(2013、2015)对 2010 年玉树  $M_s$ 7.1 地震前后的气温变化以及 2008 年汶川  $M_s$ 8.0 地震、2013 年芦山  $M_s$ 7.0 地震前后的红外亮温变化进行计算,发现在震前都存在温度明显上升的现象。

孕震区域上空的较厚云层一直是影响地面温度监测的重要因素。为了尽可能减弱云层对地面温度监测的影响,本文将美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction,简称 NCEP)地表温度数据和我国气象站气温数据作为地面温度研究的两个表征参量,并将两种数据的提取技术引入地震预测的前兆观测方法中。其中,NCEP 资料具有空间范围广、分析时间尺度长、全球标准统一和不受云层干扰等特点,是最具有全球性、综合性的气象再分析资料(Kalnay et al,1996);我国气象站气温数据来自国家级气象台站,不受云层的影响,且站点分布较为均匀,能够较为真实地反映地面温度的变化情况。应用这两种数据对西藏地区开展中强地震前后的地面温度变化特征提取研究,能较好地探讨西藏地区中强地震与地面温度的相关性,从而为西藏地区的地震监测预测研究提供新的思路。

## 1 研究数据

### 1.1 NCEP 地表温度数据和我国气象站气温数据

本研究采用的 NCEP 地表温度数据来源于 NCEP 全球再分析资料,其为美国国家环境预测中心和国家大气研究中心的合作项目,并得到了世界上一些气象组织和国家的支持。数据主要来源于地表观测资料、无线电高空探测资料、船舶探测资料、飞机观测资料和卫星等其他探测资料,应用数据同化系统将这些数据进行质量把控和融合。该数据以标准的二进制形式存储在  $1^\circ \times 1^\circ$  经纬网格点上,每天有 4 个时次(世界时 0 时、06 时、12 时、18 时)的数据,是一种多源融合数据,其观测范围大,受云层影响小,具有较强的准实时特点。为了减小不同气象背景及太阳辐射造成的影响,本文研究数据选取 1990—2014 年期间每天同一时次(世界时 18 时)的数据进行计算研究。

我国气象站温度测项分为地上和地下两种类型,地上包括距离地面 1.5m 高度的温度和 0m 地温,地下包括地下深度依次为 5cm、10cm、15cm、20cm 和 40cm 的浅层地温。本文所用每日最低气温数据,其为基于国家气象信息中心整编的国家级地面气象站基本气象要素资料中距地面 1.5m 高度处的温度,对其重采样处理后再进行空间插值得到中国气温日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点化数据集(马新野,2014)。该数据更能反映研究区域地表气温的真实温度,为去除太阳辐射的影响,选取 2010—2014 年每日最低气温数据做背景值计算进行研究。

### 1.2 地震数据

西藏地区 2010—2014 年  $M_s$ 5.0 以上地震共有 15 例(表 1),其中,  $M_s$ 5.5 以上地震 3 例,最大地震为 2013 年 8 月 12 日西藏左贡  $M_s$ 6.1 地震。这些地震主要沿断裂带分布(图 1),分别位于西藏的日喀则、聂荣、当雄、尼玛、革吉、改则和左贡等地区。3 个 5.5 级以

表1 西藏地区 2010 年 1 月 12 日—2014 年 12 月 31 日  $M_s5.0$  以上地震

| 序号 | 发震时间<br>(年-月-日) | 纬度<br>/(°N) | 经度<br>/(°E) | 震级       | 地名        |
|----|-----------------|-------------|-------------|----------|-----------|
| 1  | 2010-02-26      | 28.40       | 86.80       | 5.0      | 西藏日喀则     |
| 2  | 2010-03-24      | 32.40       | 93.00       | 5.7, 5.5 | 西藏聂荣      |
| 3  | 2010-04-17      | 32.50       | 92.80       | 5.2      | 西藏聂荣      |
| 4  | 2010-11-30      | 29.80       | 90.40       | 5.2      | 西藏当雄      |
| 5  | 2010-12-30      | 30.80       | 86.50       | 5.0      | 西藏尼玛      |
| 6  | 2011-08-02      | 33.90       | 87.80       | 5.1      | 西藏尼玛      |
| 7  | 2012-02-17      | 32.40       | 82.80       | 5.2      | 西藏革吉      |
| 8  | 2013-02-25      | 34.40       | 85.70       | 5.4      | 西藏改则      |
| 9  | 2013-05-15      | 31.60       | 86.50       | 5.2      | 西藏尼玛      |
| 10 | 2013-05-16      | 31.60       | 86.50       | 5.0      | 西藏尼玛      |
| 11 | 2013-08-06      | 31.26       | 86.42       | 5.2      | 西藏尼玛      |
| 12 | 2013-08-12      | 30.10       | 98.00       | 6.1, 5.1 | 西藏左贡      |
| 13 | 2014-02-11      | 33.80       | 89.20       | 5.1      | 西藏那曲      |
| 14 | 2014-03-31      | 31.40       | 86.55       | 5.5      | 西藏尼玛      |
| 15 | 2014-08-03      | 29.00       | 85.50       | 5.0      | 西藏日喀则(吉隆) |

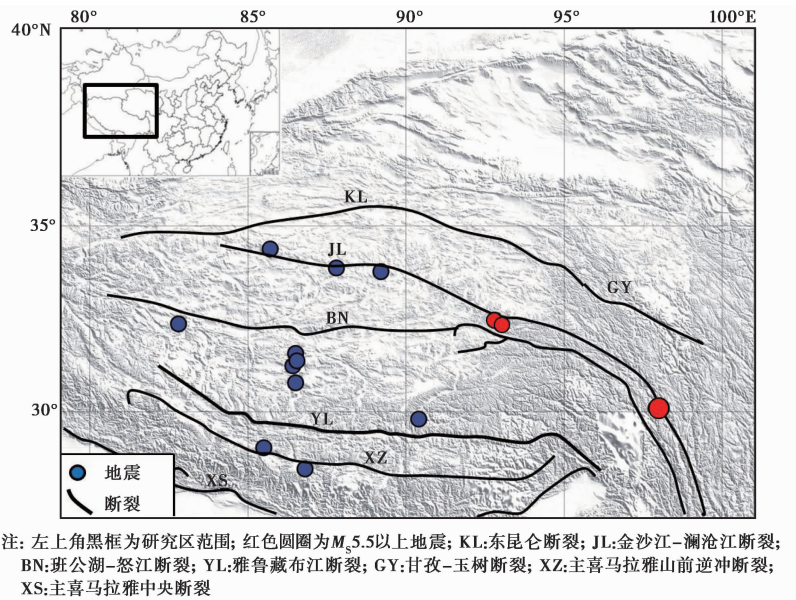


图1 青藏高原断裂构造及西藏地区 2010 年 1 月 12 日—2014 年 12 月 31 日  $M_s5.0$  以上地震分布

上地震皆沿断裂带大致按照东西走向分布,证明该区域地震活动以挤压运动为主; 12 个 5.0~5.5 级地震分布于近南北走向的高原中部断裂带上,说明西藏地区由于印度板块向欧亚板块的俯冲运动,不仅产生了挤压作用,可能还因挤压造成了板块内部错动,导致部分地震发生在错动形成的南北向断裂带上。

## 2 研究方法

### 2.1 基于 NCEP 数据的地表温度特征提取方法

地震前的热红外亮温异常信息是相对于正常动态背景场而言,若要有效提取震前热红外异常信息,必须建立正常的亮温背景场(温少妍等,2011),地表温度特征的提取也需要建立在长时间序列的背景场基础上。本文所应用的 NCEP 数据起止时间为 1990—2014 年,共 25 年,根据不同地震的研究区范围截取相应的原始数据,数据区域大小均设置为  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  的范围。由于研究使用的 NCEP 数据时间跨度较大,因此可以采用气温增量法对地震前后的地表温度特征进行提取研究,即将每次地震前二十多年的同期数据做均值计算,得出后续温度提取所需的背景场值,最后将研究区域的每日地表温度值与相应的背景场值进行差值计算,完成 NCEP 地表温度的特征提取研究。此方法可以得到地表温度值偏离多年波动平均温度值的幅度,计算如下

$$\nabla T_{i2014} = T_{i2014} - (T_{i2013} + T_{i2012} + T_{i2011} + \cdots + T_{i1991} + T_{i1990})/24 \quad (1)$$

式中,  $\nabla T_{i2014}$  为 2014 年第  $i$  天的地表温度增值量,  $T_{i2014}$  为 2014 年第  $i$  天的地表温度值,  $i$  代表相应年份的某一天。

### 2.2 基于气象站数据的地面气温特征提取方法

本文基于气象站数据进行地面气温特征提取,其中背景值计算是特征提取的重要步骤,同一点多年同时期地面气温的平均值和标准差可以用来进行背景值计算。研究所用气象站气温数据范围为 2010—2014 年,共 5 年。由于不适合采用需要大量背景数据进行计算的气温增量法,因此采用能反映当日气温值相对于历年同时期背景气温值偏移量的  $K$  值偏移指数方法。设  $N$  为可用数据年限,  $T_i(x, y, t)$  为研究区域某点位置  $(x, y)$  处在第  $i$  年第  $t$  天的气温观测值,  $T(x, y, t)$  为研究区某点位置  $(x, y)$  处在第  $t$  天  $N$  年内的气温平均值,即

$$T(x, y, t) = \frac{T_1(x, y, t) + T_2(x, y, t) + \cdots + T_i(x, y, t)}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(x, y, t) \quad (2)$$

$\sigma(x, y, t)$  为研究区某点位置  $(x, y)$  处在第  $t$  天  $N$  年内的气温标准差,即

$$\sigma(x, y, t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [T_i(x, y, t) - T(x, y, t)]^2} \quad (3)$$

上述两个参数可用来描述研究区域地面气温的正常动态背景。 $K$  被定义为气温偏移指数,则  $K$  表达式为

$$K = \frac{T_i(x, y, t) - T(x, y, t)}{\sigma(x, y, t)} \quad (4)$$

## 3 研究结果

本文计算了西藏地区 15 次中强以上地震前后的 NCEP 地温和我国气象站气温变化,发现地震前确实存在地表温度和气温升高的现象,其中 10 例地震震前同时出现了地温与气温升高特征(表 2)。以 2010 年 11 月 30 日西藏当雄  $M_s 5.2$  地震为例,两种数据计算的地震前后地面温度异常变化具有一定的相似性(图 2,图 3)。

NCEP 地表温度结果显示在地震前震中附近出现了温度升高的现象(图 2)。2010 年 11

表 2 西藏地区地震 NCEP 和我国气象站地面温度异常峰值统计

| 序号 | 地名  | 发震时间<br>(年-月-日) | NCEP 地表温度异常峰值日期<br>(年-月-日) | 我国气象站气温异常峰值日期<br>(年-月-日) | 震级      | 两种数据峰值<br>日期绝对值差 |
|----|-----|-----------------|----------------------------|--------------------------|---------|------------------|
| 1  | 日喀则 | 2010-02-26      | 2010-02-08                 | 2010-02-09               | 5.0     | 1                |
| 2  | 聂荣  | 2010-03-24      | 2010-03-27                 | 2010-03-23               | 5.7、5.5 | 4                |
| 3  | 聂荣  | 2010-04-17      | 2010-04-12                 | 2010-04-10               | 5.2     | 2                |
| 4  | 当雄  | 2010-11-30      | 2010-11-25                 | 2010-11-26               | 5.2     | 1                |
| 5  | 尼玛  | 2010-12-30      | 2010-12-29                 | 2010-12-23               | 5.0     | 6                |
| 6  | 尼玛  | 2011-08-02      |                            | 2011-07-21               | 5.1     |                  |
| 7  | 革吉  | 2012-02-17      | 2012-02-04                 | 2012-02-05               | 5.2     | 1                |
| 8  | 改则  | 2013-02-25      | 2013-02-05                 | 2013-02-06               | 5.4     | 1                |
| 9  | 尼玛  | 2013-05-15      | 2013-04-30                 |                          | 5.2     |                  |
| 10 | 尼玛  | 2013-05-16      | 2013-04-30                 |                          | 5.0     |                  |
| 11 | 尼玛  | 2013-08-06      | 2013-07-14                 |                          | 5.2     |                  |
| 12 | 左贡  | 2013-08-12      |                            | 2013-08-07               | 6.1、5.1 |                  |
| 13 | 那曲  | 2014-02-11      | 2014-01-22                 | 2014-02-06               | 5.1     | 15               |
| 14 | 尼玛  | 2014-03-31      | 2014-03-15                 | 2014-03-12               | 5.5     | 3                |
| 15 | 日喀则 | 2014-08-03      | 2014-07-15                 | 2014-07-13               | 5.0     | 2                |

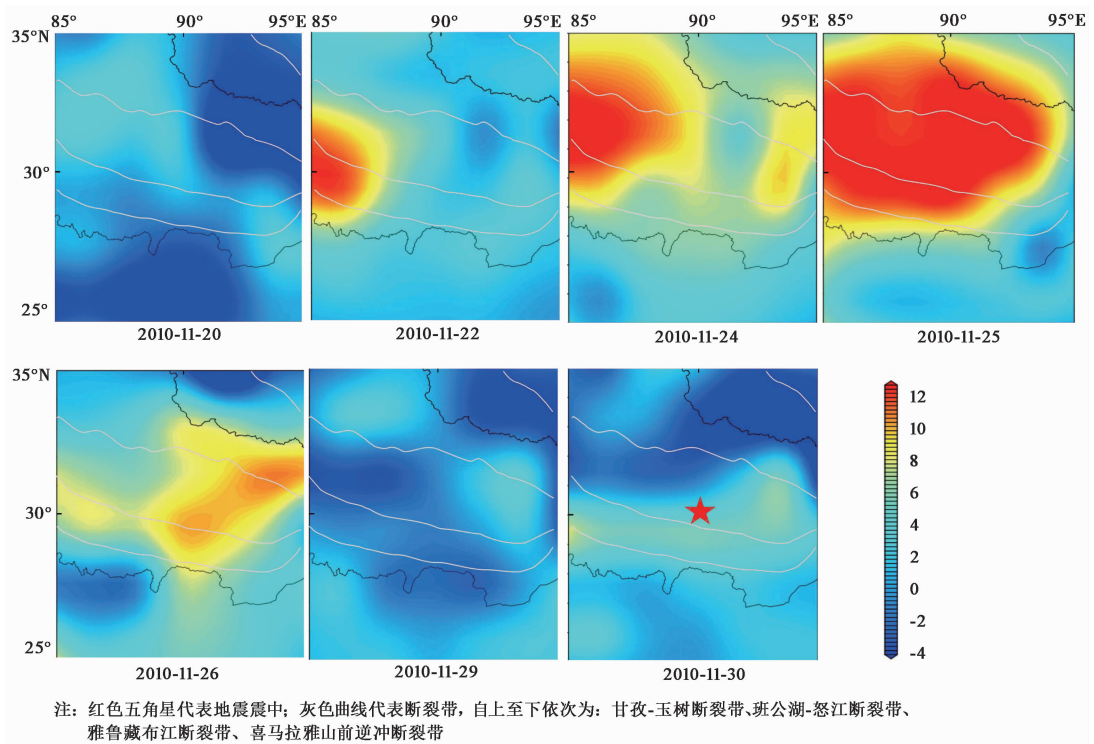


图 2 2010 年 11 月 30 日当雄地震 NCEP 地表温度变化

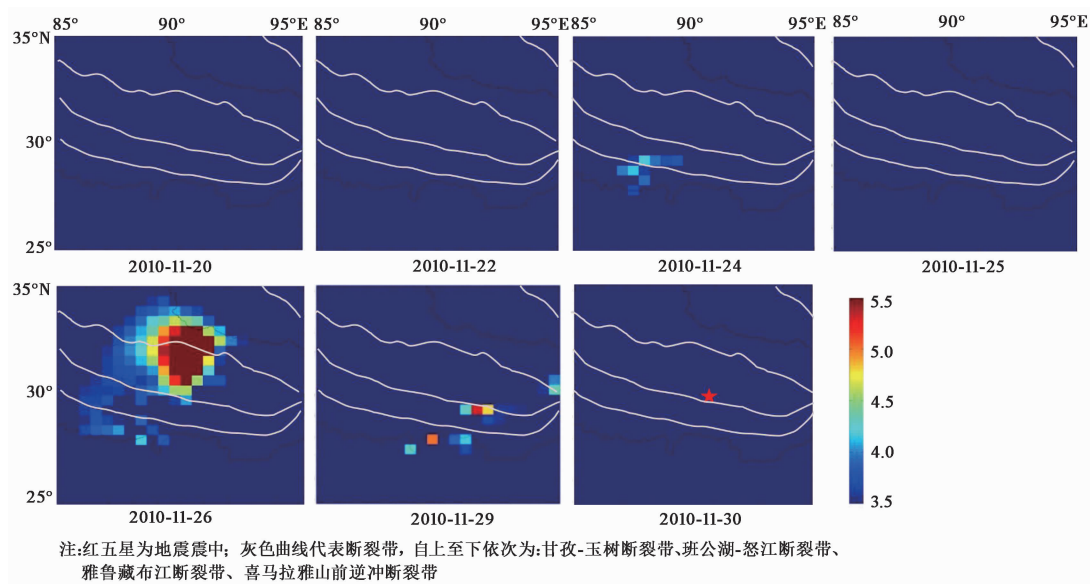


图3 2010年11月30日当雄地震气温变化

月22日研究区西部出现温度增高的趋势,24日增温更加明显,且增温面积向研究区东部扩大;高温异常在25日达到最大幅度及最大面积,增温幅度为背景值的12倍以上,增温区域主要沿班公湖-怒江断裂带和雅鲁藏布江断裂带分布,之后高温异常幅度和面积逐渐降低和减少,震前恢复正常,11月30日发生的当雄地震位于之前的高温分布区域。

图3为2010年11月30日当雄地震前气象站气温的变化情况,结果显示2010年11月20—25日研究区未出现高温异常,异常值出现在11月26日,气象站气温异常K值结果在26日达到研究区正常动态背景值的5.5倍或以上,异常区域覆盖震中且主要位于震中北部区域;之后高温异常减弱,29日在震中南部出现少量高温异常值,但数量较少,故忽略不计;30日发生当雄 $M_s 5.2$ 地震。另外14次震例中,有12次地震在震前出现NCEP地表温度增温现象,11次地震在震前出现气象站气温增温现象,说明NCEP地表温度数据和我国气象站气温数据的地温异常提取结果都证实了在西藏地区的大部分中强地震发震前,震中附近区域确实存在明显的温度升高现象。

#### 4 讨论与结论

本文计算了研究区域内15次中强以上地震前后的地表温度和气温变化,其中,10例地震在震前同时出现了NCEP地表温度和气象站气温升高的现象(表2)。

(1)断裂之间的强挤压可能造成地震前红外辐射和地面温度升高,同时,发震时断裂释放的温室气体以及地下水升温也容易导致地面温度升高(Tronin,2010;陈顺云等,2013a)。本文计算的当雄地震结果显示NCEP地表温度高温区域和气象站气温高温区域皆主要沿班公湖-怒江断裂带和雅鲁藏布江断裂带分布,说明地震前温度升高与断裂带关系密切,可能是由于地下断层大规模蠕动产生热能或释放出温室气体导致地面温度升高。两种数据计算

的高温区域位置都主要位于震中北部,其中 NCEP 地表温度数据比我国气象站气温数据的分辨率低,其一个像素点代表的实际面积较大;另外,NCEP 数据属于多源数据综合处理结果,气象站数据较 NCEP 数据来源单一,因此 NCEP 地表温度高值区域显示面积较大。

(2)本文研究的 15 次  $M_s 5.0$  以上地震中,13 次地震前有 NCEP 地表温度增温现象,12 次地震前有气象站气温增温现象,且除了 2010 年 3 月 24 日聂荣  $M_s 5.7$ 、 $M_s 5.5$  地震的 NCEP 地表温度增温出现在震后几天外,两种数据计算的所有增温结果均出现在地震发震前。通过比较分析西藏地区同时出现地表温度及气温增温的 10 个典型震例,发现两种数据的温度峰值日期非常接近,前后均值不超过 4 天(图 4)。

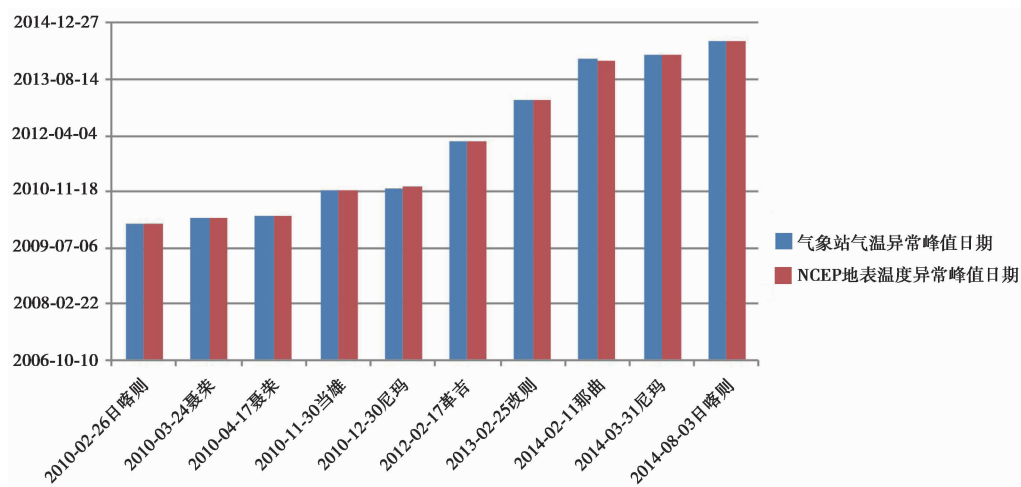


图 4 两种数据温度异常峰值日期分析

基于我国气象站气温数据和美国 NCEP 地表温度数据,对西藏地区多年中强以上地震进行的气温和地表温度异常提取计算,结果显示大部分震例震前均出现两种温度明显增温的现象,并且两种数据的高温峰值日期非常接近,相互印证了地震前存在地面温度升高的结论,其可以作为遥感卫星红外监测的辅助数据。

## 参考文献

- 巴桑次仁,曹忠权,邓桂英,等,2009. 西藏当雄 6.6 级地震与尼木 6.5 级地震震害特征分析. 震灾防御技术, **4**(2): 233~239.
- 陈顺云,刘培洵,刘力强,等,2013a. 芦山地震前康定地温变化现象. 地震地质, **35**(3): 634~640.
- 陈顺云,马瑾,刘培洵,等,2013b. 利用 Terra 和 Aqua 卫星地表温度探索汶川地震同震热响应. 地球物理学报, **56**(11): 3788~3799.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等,2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学:(D 辑), **32**(12): 1020~1030.
- 李国辉,白玲,丁林,等,2020. 2019 年西藏墨脱  $M_s 6.3$  地震震源参数及其构造意义. 地球物理学报, **63**(3): 1214~1223.
- 马瑾,单新建,2000. 利用遥感技术研究断层现今活动的探索-以玛尼地震前后断层相互作用为例. 地震地质, **22**(3): 210~215.
- 马未宇,徐秀登,徐保华,等,2006. 印度尼西亚  $M_w 9.0$  地震序列与增温异常和天体引潮力的相关关系研究. 西北地震学报, **28**(2): 129~133, 158.
- 马未宇,于晨,姚琪,等,2020. 2020 年 7 月 12 日唐山  $M_s 5.1$  地震遥感热参量时空变化分析. 中国地震, **36**(3): 367~374.

- 马新野,2014. 不同气候带城市化效应的差异和城市扩展对区域气候的影响. 博士学位论文. 南京:南京大学.
- 温少妍,屈春燕,闫丽莉,等,2011. 区域红外亮温背景场建立方法及初步应用. 地震,31(2):59~67.
- 闫丽莉,屈春燕,温少妍,等,2012. 卫星热红外亮温、气温及地温观测的年变化对比研究. 地震学报,34(2):257~266.
- 张铁宝,路茜,辛华,等,2013. 2010年玉树7.1级地震前后气温变化分析. 四川地震,(4):7~11.
- 张铁宝,路茜,辛华,等,2015. 汶川和芦山地震前后巴颜喀拉地块中东段红外亮温分析. 中国地震,31(2):344~352.
- 张燕,程顺有,赵炳坤,等,2013. 青藏高原构造结构特点:新重力异常成果的启示. 地球物理学报,56(4):1369~1380.
- Ding L, Kapp P, Wan X Q, 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. *Tectonics*, 24(3):TC3001.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437~472.
- Mohamed E K, Gahalaut V K, Sekertekin A, et al, 2021. Atmospheric, ionospheric and earth-related variations associated with the 11th August 2012 earthquakes, Ahar, Iran. *J Atmos Sol Terr Phys*, 216:105595.
- Tronin A A, 2010. Satellite remote sensing in seismology. A review. *Remote Sens*, 2(1):124~150.
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28:211~280.
- Zhang Y, Meng Q Y, Wang Z A, et al, 2021. Temperature variations in multiple air layers before the  $M_w$  6.2 2014 Ludian earthquake, Yunnan, China. *Remote Sens*, 13(5):884.

## Characteristics Extraction of Land Ground Temperature Before and After the Earthquakes in Tibet

Lu Xian<sup>1)</sup>, Meng Qingyan<sup>2)</sup>, Zhang Xiaodong<sup>3)</sup>, Liu Jie<sup>1)</sup>, Ren Jing<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

3) Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

**Abstract** Using the air temperature data based on the China Meteorological Stations and the surface temperature data from National Centers for Environmental Prediction of America, the temperature changing extraction of 15 cases of  $M_s \geq 5.0$  earthquakes from January, 2010 to December, 2014 in Tibet was studied. The results showed that air temperature enhancement anomaly appeared in 12 cases before the earthquake, and surface temperature enhancement anomaly appeared in 13 cases. There were 10 earthquakes which had the two kinds of temperature increment phenomena. Moreover, the peak date of two data were very close. It is mutually confirmed that there was rising land round temperature before moderate-strong earthquakes in Tibet.

**Keywords:** Tibet; Earthquake; Land surface temperature; Meteorological Station; NCEP