

张丽峰, 郭晓, 章鑫, 屠泓为. 2018. 2017年九寨沟 $M_S 7.0$ 地震前热红外亮温异常与盆地效应. 地震学报, 40(6): 797–808. doi: 10.11939/jass.20170207.

Zhang L F, Guo X, Zhang X, Tu H W. 2018. Anomaly of thermal infrared brightness temperature and basin effect before Jiuzhaigou $M_S 7.0$ earthquake in 2017. *Acta Seismologica Sinica*, 40(6): 797–808. doi: 10.11939/jass.20170207.

2017年九寨沟 $M_S 7.0$ 地震前热红外 亮温异常与盆地效应^{*}

张丽峰¹⁾ 郭 晓^{2),†} 章 鑫³⁾ 屠泓为¹⁾

1) 中国西宁 810001 青海省地震局

2) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

3) 中国广州 510070 广东省地震局

摘要 以中国静止气象卫星亮温数据为数据基础, 采用小波变换和功率谱估计方法进行处理分析, 并对处理后的数据进行时空扫描。结果表明: ①在2017年8月8日九寨沟 $M_S 7.0$ 地震前, 沿龙门山断裂带存在一条热红外辐射增温带, 其热辐射异常主要分布于四川盆地边缘, 异常面积最大可达 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 九寨沟地震即发生在增温区域的边缘; ②九寨沟地震的相对功率谱时序演化特征显示, 2017年7月初相对功率谱幅值迅速升高以后, 长时间持续呈高幅值状态, 且与过去十年的数据相比相对功率谱较为突出, 直到地震后一段时间才恢复; ③九寨沟地震异常的分布与汶川地震前热辐射异常展布相似, 对其它发生在含油气盆地边缘的地震进行综合分析认为, 热辐射异常均具有类似盆地形态的特征, 反之, 这种类似盆地形态的异常与 $M_S \geq 6.5$ 地震的对应率为 75%; ④地震盆地效应是位于盆地边缘的、具有不同发震构造的地震表现出相似的热辐射空间展布的主要原因, 与地球放气理论机理解释相一致。

关键词 九寨沟地震 热红外亮温 相对功率谱异常 盆地效应

doi: 10.11939/jass.20170207 中图分类号: P315.72 文献标识码: A

Anomaly of thermal infrared brightness temperature and basin effect before Jiuzhaigou $M_S 7.0$ earthquake in 2017

Zhang Lifeng¹⁾ Guo Xiao^{2),†} Zhang Xin³⁾ Tu Hongwei¹⁾

1) Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China

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

3) Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China

Abstract: In this paper, wavelet transform and power spectrum estimation methods are used for processing and analyzing the brightness temperature data from China's geostationary meteorological satellite. Then the obtained time-frequency data is scanned by time and space scanning method. The results show that: ① Before the Jiuzhaigou $M_S 7.0$ earthquake on August 8, 2017,

* 基金项目 青海省地震科学基金(2017B06)和中国地震局监测、预报、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-172003)联合资助。

收稿日期 2017-11-24 收到初稿, 2018-06-13 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: guox@gssb.gov.cn



there was a thermal infrared radiation warming zone along the Longmenshan fault zone. The thermal radiation anomaly is mainly distributed on the edge of the Sichuan basin, with an anomalous area of $6 \times 10^4 \text{ km}^2$. The Jiuzhaigou earthquake occurred at the edge of the warming area. ② The time series evolution characteristics of relative power spectrum of the Jiuzhaigou earthquake show that after the relative power spectrum amplitude increases rapidly in early July 2017, there is a long-term continuous high amplitude state, which is more prominent than the data of the past ten years. It did not recover until some time after the earthquake. ③ The anomalous distribution of the Jiuzhaigou earthquake is similar to that of the Wenchuan earthquake. The comprehensive analysis of other earthquakes occurring at the edge of the petrolierous basin suggests that the thermal radiation anomalies are similar to the basin morphology. The corresponding rate of this basin-like anomaly is 75% compared with the $M_S \geq 6.5$ earthquake. ④ The earthquake basin effect is the main reason for the similar thermal radiation spatial distribution of earthquakes with different seismogenic structures located at the edge of the basin, which is consistent with the theoretical explanation of the earth deflation theory.

Key words: Jiuzhaigou earthquake; thermal infrared brightness temperature; anomaly of relative power spectrum; basin effect of earthquake

引言

与地震相关的热辐射研究始于 20 世纪 80 年代 (Gorny *et al.*, 1988; Tronin, 1996), 自此国内外不少研究人员进行了与此相关的研究(强祖基等, 1990; 刘德富等, 1999; Tramutoli *et al.*, 2001; Saraf, Choudhury, 2003; Choudhury *et al.*, 2006). 地表温度场中存在着与活动构造带密切相关的热信息, 地震前后温度场的变化与同震形变观测结果相吻合(马瑾等, 2010; 陈顺云等, 2014), 与地震活动相关的热异常也已得到论证(邓志辉等, 2003; Ouzounov, Freund, 2004). Tronin 等(2004)研究了 2003 年 12 月 26 日伊朗巴姆 $M_W 6.6$ 地震得出, 震前 4 天出现陆面温度(land surface temperature, 简写为 LST)增温, 幅度为 7°C — 10°C ; Saraf 等(2012)分析 2011 年 1 月 19 日达尔本丁 $M_S 7.2$ 地震得出震前两天 LST 增温异常幅度达 8°C — 10°C , 增温面积约为 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$. 近年来国内研究人员在此方面的研究取得了一定进展(魏乐军等, 2008; 康春丽等, 2011; 解滔等, 2015), 大量震例的研究结果表明, 强震前确实存在热辐射异常. 张元生等(2010)根据地表热辐射影响因素所具有的不同周期, 利用小波变换法去除影响因素, 从而有效地提取地震热异常, 并对 2008 年汶川、于田、乌恰地震进行了热辐射变化分析, 分析结果显示这 3 次地震在发震前均呈现明显的热异常特征, 进而总结出发震区域一般位于异常区边缘及区内的活动断层上, 发震时间在功率谱达到峰值之后的 35 天内. 其它的相关研究还有很多(张璇等, 2013; 李青梅等, 2015), 这些研究成果在发震地点和发震时间上意义明确, 也可为短期地震预测提供经验.

在大量震例研究的基础上, 目前已形成了多种热异常提取方法, 这些方法主要是通过对比地震前后卫星热红外亮温图像的变化来识别异常. 随着该领域研究的不断深入, 又发展出一些新的研究方法. 例如: Tramutoli 等(2001)提出的“稳健卫星技术”(robust satellite techniques, 简写为 RST)反映了时空域上的地震热辐射异常信息; 陈梅花等(2007)将“断层带内外温差法”用于研究 1997 年玛尼 $M_S 7.5$ 地震, 尽管受到降雪等因素的干扰, 但还是有效地提取到了地震前的增温信息, 震后相对亮温差恢复至正常状态; 郭晓等(2010)通过研究强震

长波辐射异常变化时提出“功率谱相对变化法”，并使用该方法对中国大陆6次M_S6.5地震进行分析，结果表明震前均出现了不同程度的功率谱幅值增强现象；[温少妍\(2011\)](#)利用“历年同期亮温偏移指数法”研究2008年汶川M_S8.0地震和2010年玉树M_S7.1地震，得出了二者亮温异常的时空演化规律；[解滔等\(2015\)](#)使用“连续小波变换法”对于田地震的亮温异常进行了研究。地震热红外异常成因机理方面的探索也取得了一定进展，但目前尚未形成统一认识，主要有以下几种观点：① 地球放气-电磁增温说。震前应力积累变化使地下气体（如CO₂, CH₄）沿微裂隙溢出，辐射增强，另外地壳活动强烈时电磁场会出现异常，和太阳辐射一并促进温室气体的热辐射，进而在震源区附近出现大面积、高幅度热异常（[强祖基等, 1992, 1998](#)）；② 应变能转换说。[吴立新等\(2001\)](#)的撞击瞬态监测试验显示撞击瞬间出现明显的升温现象，且震源区岩层蠕动使断裂带两侧摩擦生热也会引起地面升温；[刘培洵等\(2004\)](#)研究得出岩石破裂前在未来断层处出现红外热像，岩石弹性形变压力与温度表现为正相关，即压力越大温度增加越快；③ 地球温室效应-大气耦合说。地球放气温室效应为地震热辐射异常的基本成因，间接成因与大气中水汽含量有关，地球放气形成相对高温区，加速水汽蒸发，在高空水蒸气遇冷凝结，这一机理可以解释多数大地震发生后震中附近下大雨或下大雪的自然现象（[张元生等, 2010](#)）。

本文基于中国静止气象卫星FY-2C/E/G亮温数据产品，使用小波变换和功率谱估计法对2017年九寨沟M_S7.0地震前的资料进行扫描，发现沿龙门山断裂带存在一条热红外增温带。九寨沟地震的发震断层为东昆仑断裂的一个分支，即介于岷江断裂与塔藏断裂之间的树正断裂。从构造上来说，汶川地震与九寨沟地震是处于不同构造上的两次地震，但对比汶川地震的热异常区域，为何两次地震的热红外增温区域表现出了一定的相似性？本文基于该问题，拟分析讨论九寨沟M_S7.0地震前的热红外亮温变化过程，类比分析盆地周缘M_S≥6.5地震的热辐射异常形态，结合地球放气理论尝试性地解释盆地周缘地震的热辐射异常现象。

1 数据与方法

本文从中国静止气象卫星FY-2C/E/G亮温小时数据产品中选取午夜（凌晨1时至5时）5个时次的数据，以避免太阳直接辐射造成的影响，并对5个时次数据求均值后采用补窗法进行简单的去云处理，形成亮温日值数据。

数据处理方法为小波变换和功率谱估计法。小波变换是在傅里叶变换的基础上发展演变而来的，傅里叶变换适用于稳态信号的频域分析，而自然界中的信号多为非稳态信号，信号中不同频率成分的出现时间无法判断，短时傅里叶变换便应运而生，该变换在一定程度上克服了上述不足，但一旦加窗，又无法适应所有的频率成分，对任一时间点上的频率分量依然无从知晓。小波变换则弥补了上述不足，其最大的特点是具有自适应性和数学显微镜性，在几乎不损失原始信号的情况下对原始信号进行重构，能够聚焦到信号的任何细节，是当前信号时频分析的有效工具。有限时间序列的小波变换公式为

$$W_{\psi}f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt, \quad (1)$$

式中：f(t)为原始信号；W_ψf(a,b)为小波变换后的各频段分量；a为尺度因子，控制小波函数的伸缩，对应于变量的频率；b为时间平移因子，控制小波函数的平移； $\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波母

函数, 文中以 Daubechies 小波系中的 db8 小波基函数对原始亮温数据进行小波变换处理。

以九寨沟地震为例, 图 1 给出了震中($33.2^{\circ}\text{N}, 103.8^{\circ}\text{E}$)处 2014—2017 年的原始亮温(brightness temperature, 简写为 BT)值(图 1a)及小波变换后的信息(数据更新至 2017 年 9 月 10 日, 图 1b 为 2 阶小波尺度部分). 从图 1 可以看出, 7 阶小波尺度部分(图 1d)的年变特征明显, 因此可将地球年变温度场等长周期成分通过去除 7 阶小波尺度部分来消除其影响, 云雨、寒热气流引起的温度变化时间较短, 一般为几小时至几天, 这部分影响因素可通过去除 2 阶小波细节部分(图 1c)来消除, 处理后的数据为亮温波形数据, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ (图 1e).

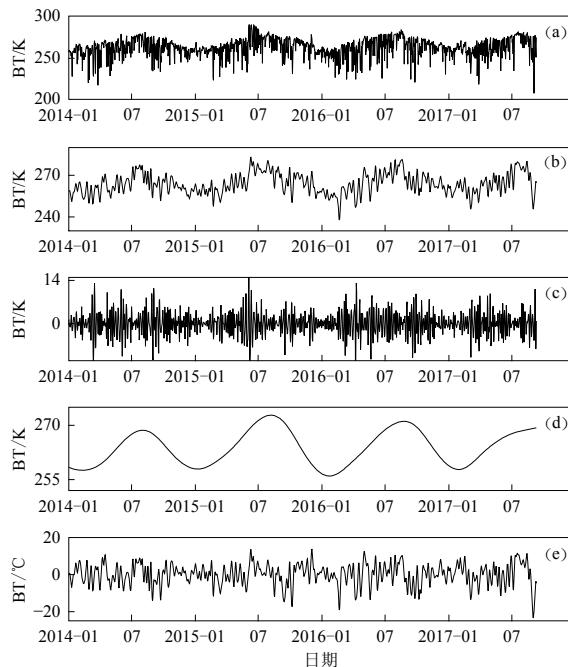


图 1 热红外原始亮温(BT)数据及其经小波变换后的信息

- (a) 原始亮温数据;
- (b) 2 阶小波尺度部分;
- (c) 2 阶小波细节部分;
- (d) 7 阶小波尺度部分;
- (e) 2 阶小波尺度部分与 7 阶小波尺度部分之差

Fig. 1 The results of wavelet transformation of thermal infrared brightness temperature (BT) data

(a) Original record of brightness temperature; (b) Results with 2nd-order scale analysis; (c) Details of 2nd-order wavelet; (d) Results with 7th-order scale analysis; (e) Difference between 2nd-order scale analysis and 7th-order scale analysis

功率谱估计分为经典谱估计和现代谱估计, 而经典谱估计主要有周期图和自相关两种方法, Welch 算法是在周期图法的基础上改进而来的. 本文中的功率谱估计参考了 Welch 算法, 先将长度为 N 的数据分为 L 段, 每段 M 个点, 再对每段数据加窗求傅里叶变换, 最后计算各段功率谱的平均值, 其计算式为

$$\overline{P_x(w)} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_i(n)w(n)e^{-jwn} \right|^2, \quad i=1, 2, \dots, L, \quad (2)$$

式中, $U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n)$ 为归一化因子, $w(n)$ 为窗函数, $\overline{P_x(w)}$ 为功率谱平均值的最后计算结果.

计算上述小波变换及去除影响因素之后数据的功率谱, 以 $n=64$ 天为窗长, $m=1$ 天为滑

动窗长作傅里叶变换, 时间约定为窗内数据的最新时间, 对每个像元的时程数据每滑动一次可得一组功率谱。为了对比地震前后功率谱的异同, 对其进行幅值相对处理, 最后得到的结果为各像元($0.05^\circ \times 0.05^\circ$)的相对功率谱幅值。功率谱计算及相对处理过程见郭晓等(2010), 在此基础上本文计算了相对功率谱背景值和标准差, 详细计算过程见张丽峰等(2016)。

2 结果分析

2.1 九寨沟地震热红外时空变化

2017年8月8日四川阿坝州九寨沟县发生了 $M_S 7.0$ 地震, 震源深度为 20 km, 震中为 ($33.2^\circ\text{N}, 103.8^\circ\text{E}$)。在九寨沟地震前的日常资料扫描分析中, 发现沿龙门山断裂带存在一条热红外增温带(图 2)。

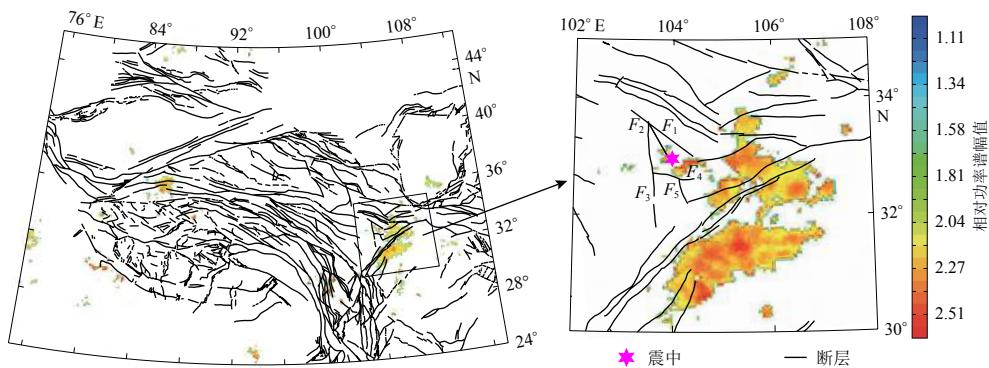


图 2 2017 年 7 月 23 日中国中西部的热红外异常空间分布图

F_1 : 塔藏断裂; F_2 : 树正断裂; F_3 : 岷江断裂; F_4 : 虎牙断裂; F_5 : 雪山梁子断裂

Fig. 2 Spatial distribution of thermal infrared anomaly in central-western China on July 23, 2017

F_1 : Tazang fault; F_2 : Shuzheng fault; F_3 : Minjiang fault; F_4 : Huya fault; F_5 : Xueshanliangzi fault

对上述区域进行时空扫描, 观察到在 7 月初沿龙门山断裂带即有微弱的热辐射异常存在(图 3); 随着时间的推移, 热辐射的幅度和面积都逐渐增大, 至 7 月 23 日辐射面积达到最大, 大于 6 倍平均值的面积大概为 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本次地震与张元生等(2010)对汶川地震前的分析结果在空间上存在相似的辐射异常区, 汶川地震在功率谱达到峰值后 11 天发震。鉴于在汶川地震中积累的经验, 持续跟进分析资料(更新至 7 月 30 日), 观察到辐射增温区域相比 7 月中旬有所收缩, 但仍然清晰可见。随后 8 月 8 日九寨沟县发生了 $M_S 7.0$ 地震, 该地震处于增温区域边缘。震后持续补充资料, 结果显示: 8 月 2 日辐射增温区依旧沿龙门山断裂带分布, 辐射面积有所增大, 之后收缩, 直至 8 月 6 日辐射面积缩至最小, 8 月 7 日辐射面积又有回返增大趋势, 8 月 8 日发震, 之后辐射面积持续增大, 直到 8 月 14 日转为减小; 辐射增温区后续向南收缩, 面积持续减小, 直到 9 月 10 日热辐射异常几乎消失。

从构造空间看, 本次热辐射异常最初出现在龙门山断裂带附近, 于 7 月 20 日局部扩展至树正断裂附近并逐渐增强。异常整体显示为增强趋势, 其展布与龙门山断裂带走向一致, 主要分布于四川盆地西北边缘(图 3)。7 月 23 日以后异常辐射面积收缩至龙门山断裂带南段, 到 8 月 6 日辐射面积减至近几日的最小值, 7 日略有增大, 8 日发生地震, 之后异常持续向四川盆地内部及龙门山断裂带北段扩展。8 月 14 日以后异常呈减弱趋势, 收缩于龙门山断裂带南段与鲜水河断裂的交会区域, 9 月中旬基本消失。本次九寨沟地震前后的热辐射异常

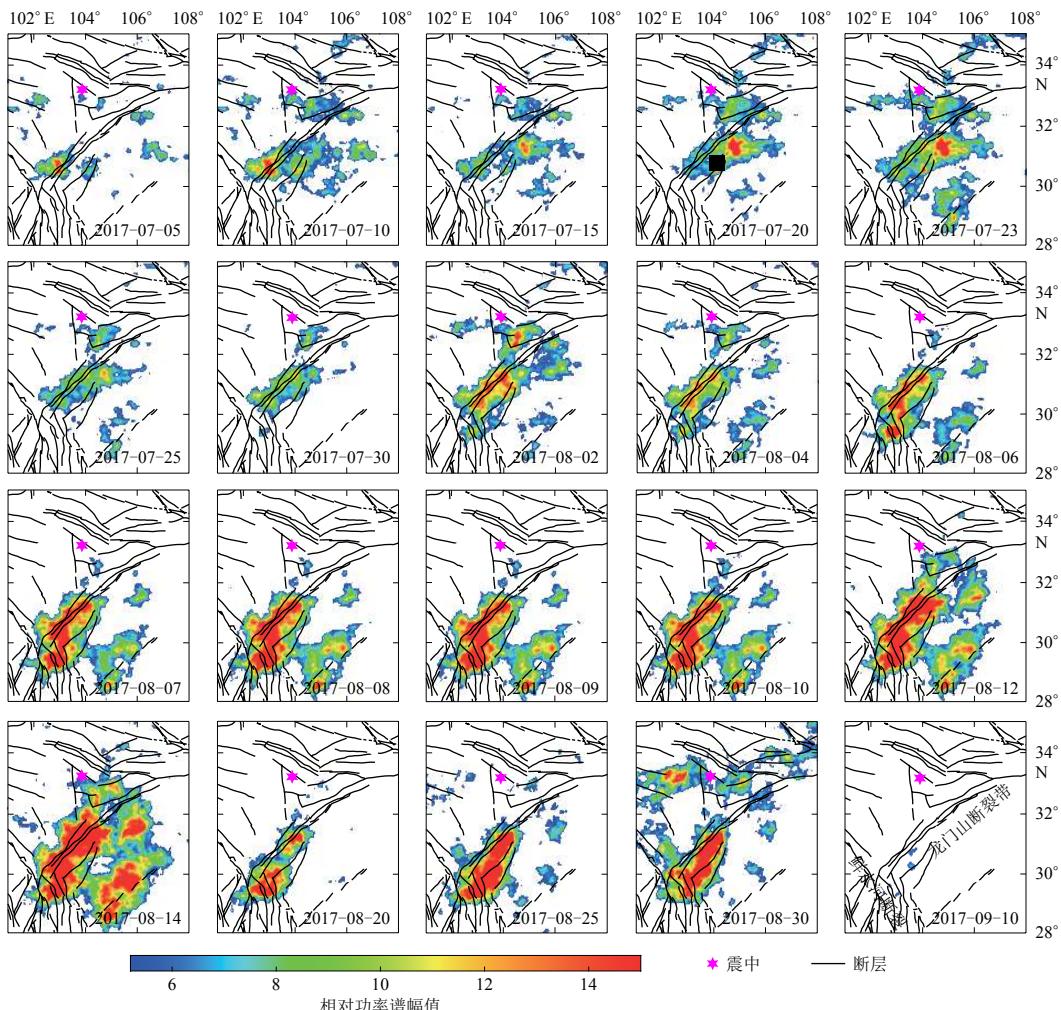


图 3 九寨沟地震前后相对功率谱的时空变化过程

Fig. 3 Spatio-temporal evolution of relative power spectrum for Jiuzhaigou earthquake

的空间演化与汶川地震极其类似，均经历了从龙门山断裂带北段扩展到四川盆地最后收缩于龙门山断裂带南段这一过程。异常随时间的演变可能与应力的积累变化过程有关，应力持续变化导致地热资源丰富的区域逸出气体增多(郭晓等, 2014)，这可能是上述相似性出现的原因。

2.2 九寨沟地震时序曲线特征

提取异常显著区域 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 范围内(图 3 中 2017-07-20 小图的黑色方形)的相对功率谱均值，在此基础上计算其功率谱背景值和标准差，生成时序曲线。图 4 中的功率谱背景值指每年相同天数的相对功率谱均值，标准差在此基础上计算而得。

图 4 显示出相对功率谱在地震前出现了 3 次峰值(蓝色曲线)，最近一次出现在震前 6 天(8月 2 日)，相对功率谱幅值为平均值的 11.5 倍，截至目前幅值大于 8 倍的持续时间为 40 天，震后两天幅值则变为转折上升。九寨沟地震前后的相对功率谱幅值变化起伏较大，在往年无地震的时候是否存在这种功率谱幅值大幅度变化的现象？为了对比研究这个问题

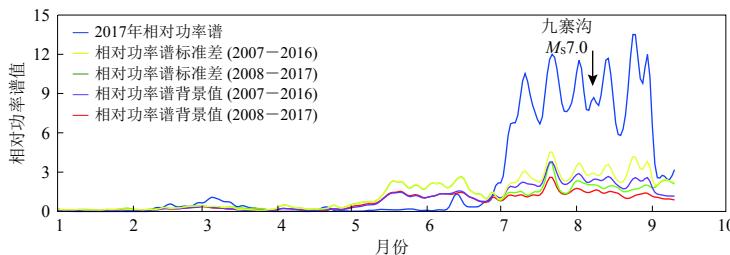


图 4 九寨沟地震区的相对功率谱时序曲线

Fig. 4 Time-series curves of relative power spectrum of anomaly area for Jiuzhaigou earthquake

题, 文中计算了相对功率谱的两组背景值及标准差, 其中一组背景值及标准差的计算结果包含九寨沟地震前后的数据(黄色和紫色曲线), 另一组由2007—2016年10年数据计算得到(绿色和红色曲线)。结果显示: ①7月之前, 两组背景值和标准差曲线各自几乎完全重合, 说明2017年1—7月之间的数据对背景值的贡献不大; ②两组曲线在5—6月有所上升, 这表示往年资料在此期间其相对功率谱幅值也有所上升, 但是上升幅度与7—8月数据(2008—2017年10年数据)相比较低, 这说明往年资料的上升幅度与九寨沟地震期间出现的这种大幅度变化不同, 这也使得两组曲线在7—8月各自出现分离(紫色与红色曲线分离, 黄色与绿色曲线分离); ③这种偏离直到9月初又趋于一致, 由九寨沟地震引起的相对功率谱幅值的显著变化消失。

3 对盆地效应的探讨

3.1 盆地与其周缘地震热辐射关系

九寨沟地震的热辐射异常边界经过龙门山断裂带, 与龙门山断裂带走向一致, 主要分布在四川盆地西北边缘, 异常在南部和西北部有小的分支, 西北部分支恰好覆盖了岷江、虎牙及雪山梁子等断裂, 九寨沟地震即发生在西北部异常边缘(图5e)。汶川地震的热辐射以龙门山断裂带为边界, 主要分布于四川盆地北部及以外, 汶川地震发生在异常最西部的顶角上(图5b)。这两次地震的热辐射异常在空间上均与龙门山断裂带走向一致, 形态相似。汶川地震发生在龙门山推覆构造带中段(徐锡伟等, 2013), 而九寨沟地震的发震断层为东昆仑断裂的一个分支, 即介于岷江断裂与塔藏断裂之间的树正断裂, 从构造上来说汶川地震与九寨沟地震是两次独立的地震, 但两者的热辐射异常区域表现出了一定的相似性。

基于这种现象, 本文分析了2008年以来新疆地区盆地周边地震所对应的热辐射状态, 结果显示2008年于田 $M_S 7.3$ 地震、2012年新源 $M_S 6.6$ 地震和2015年皮山 $M_S 6.5$ 地震的热辐射异常形态均与盆地相关, 如图5a, c, d所示, 热辐射异常均贯穿了塔里木盆地, 但从发震构造上来说这是三次独立地震, 可见新疆塔里木盆地在大震前也存在类似现象。九寨沟地震后一天就发生了新疆精河 $M_S 6.6$ 地震, 该地震处于准噶尔盆地边缘, 图5f为精河地震前的热红外辐射空间展布。表1统计了上述地震与相关盆地之间的一些参数, 从各震例所对应的热辐射异常面积的分配来看, 盆地一侧的面积占比均超过50%, 其中于田、皮山及精河地震的占比更是高达100%, 似乎异常面积越大, 处于盆地内部的异常占比也越高。

这些与异常相关的盆地均蕴藏着丰富的天热气, 含油气盆地的大量天然气对震前应力的变化较为敏感, 当应力积累到一定程度, 盆地周缘的活动构造带及一些微裂隙均成为天然

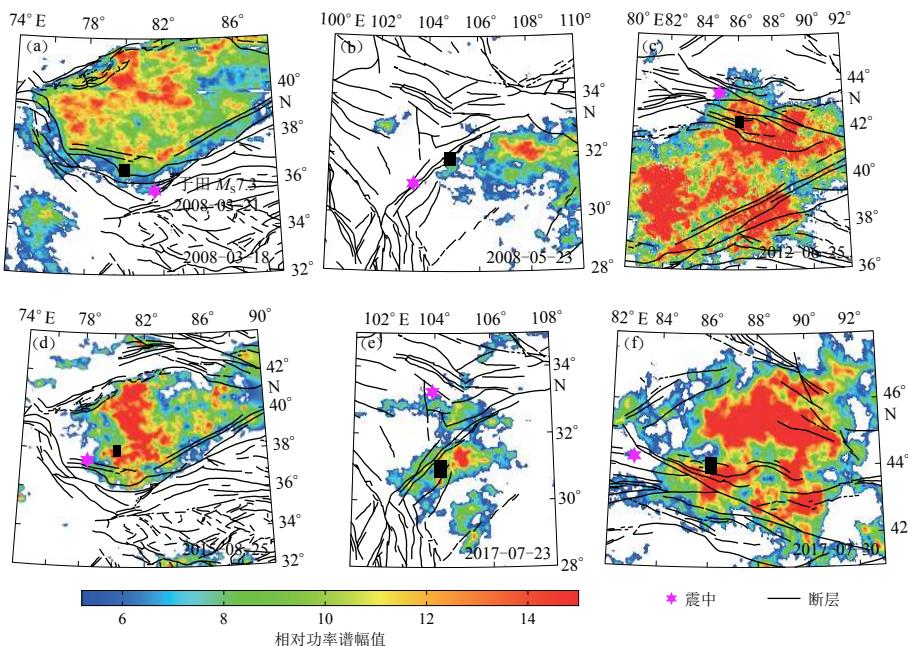


图 5 6 次盆地周缘地震的热辐射异常空间分布

(a) 2008 年 3 月 21 日于田 $M_S 7.3$ 地震; (b) 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_S 8.0$ 地震; (c) 2012 年 6 月 30 日新源 $M_S 6.6$ 地震;
 (d) 2015 年 7 月 3 日皮山 $M_S 6.5$ 地震; (e) 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_S 7.0$ 地震; (f) 2017 年 8 月 9 日精河 $M_S 6.6$ 地震

Fig. 5 Spatial distributions of thermal infrared anomalies for six earthquakes around the basins

(a) Yutian $M_S 7.3$ earthquake on March 21, 2008; (b) Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake on May 12, 2008;
 (c) Xinyuan $M_S 6.6$ earthquake on June 30, 2012; (d) Pishan $M_S 6.5$ earthquake on July 3, 2015;
 (e) Jiuzhaigou $M_S 7.0$ earthquake on August 8, 2017; (f) Jinghe $M_S 6.6$ earthquake on August 9, 2017

表 1 盆地周缘地震的热辐射与对应盆地之间的相关性参数

Table 1 The correlation parameters between the thermal radiation anomalies for six earthquakes and the corresponding basins

发震日期	地点	M_S	特征周期/d	发震构造	响应盆地	盆地性质	异常最大面积/(10^4 km^2)	盆地一侧占比	相对盆地位置
2008-03-21	于田	7.3	64	郭扎错断裂	塔里木盆地	含油气田	55	100%	盆地内及边缘
2008-05-12	汶川	8.0	13	龙门山断裂带	四川盆地	含油气田	12	66%	盆地北部及以外
2012-06-30	新源	6.6	11	伊犁盆地北缘断裂	塔里木盆地	含油气田	60	83%	盆地中东部及以外
2015-07-03	皮山	6.5	32	泽普断裂	塔里木盆地	含油气田	44	100%	盆地内及边缘
2017-08-08	九寨沟	7.0	11	树正断裂	四川盆地	含油气田	8	50%	盆地西北及以外
2017-08-09	精河	6.6	21	库松木契克山前断裂	准噶尔盆地	含油气田	25	100%	盆地及以外

气上涌的通道，溢出地表的甲烷、二氧化碳等温室气体的辐射增温效果明显。大震前，盆地出现大片区域的辐射增温异常可能与天然气外泄有关，这或许可以解释为何不同发震构造上的地震却呈现出相似的辐射增温异常分布。这是否是与地震有关的“盆地效应”？为了说明地震盆地效应的可能性，本文分析了 2008 年以来四川和新疆盆地内的热辐射异常变化情况，结果显示研究区域内共出现 8 次类似盆地形态的异常，对应于盆地周缘 $M_S 6.5$ 以上地震，8 个震例中的 6 次地震存在此类异常，占比为 75%。以往地震热辐射研究均从地震出发寻找异常，反过来由异常来对应地震的研究是对异常的一种判断，上述研究结果表明地震盆

地效应是有一定可信度的。

此外, 强祖基等(1994)的研究结果表明, 油气聚集带与地震前的卫星热红外增温异常有较好的对应关系; 黄福林等(1998)认为地震前油气盆地区低空大气中的甲烷浓度高于平均值两倍多, 二氧化碳高于平均值2.6倍; 卢振权等(2005)经过长期的观察研究认为中国近海海域临震前的卫星热红外增温异常与已知油气盆地、热水盆地等的分布区一致; 郭卫英等(2006)关于2003年伽师—巴楚 $M_S 6.8$ 地震的研究显示, 震前的红外增温区就出现在塔里木盆地西北部边缘, 并指出该增温现象可能与孕震机制有关。这些研究均表明地震前的卫星热辐射增温异常与含地热资源丰富的盆地有一定关联。

3.2 对地震预测的启示

图6为图5中震中附近黑色方块所示区域一年时间尺度相对功率谱幅值的变化曲线, 由表2所列地震的相对功率谱时序曲线总结出一些特征: 相对功率谱峰值均在7倍以上; 峰值大都出现在震前, 最长为震前8天, 最近为震前4天。值得指出的是, 地震孕育及临震阶段的应力变化是一个复杂的过程, 可以通过GPS等手段来观测地表形变, 但是对于地下微弱细小的变化和破裂仍难以捕捉。另外, 究竟应力积累到什么程度才会发震, 目前尚难以判断。盆地在震前所表现出的热辐射变化信息或许是对地下复杂精细变化的宏观反映, 因此分析

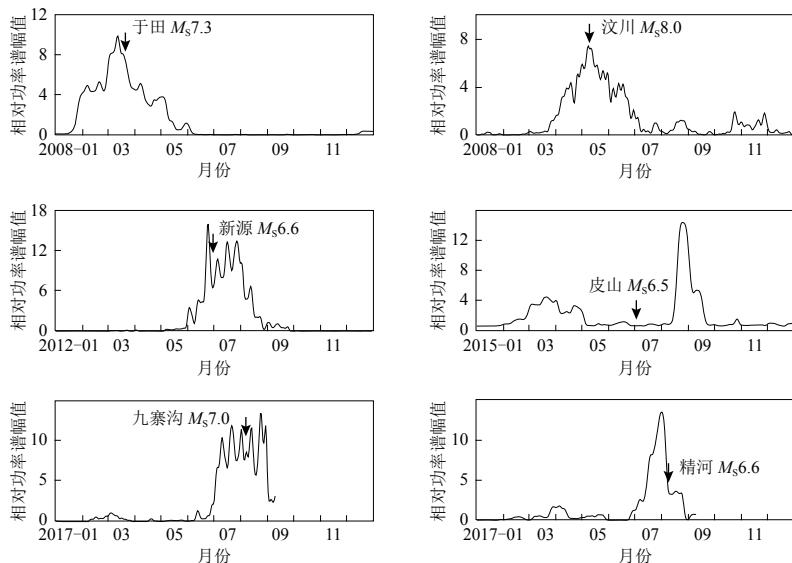


图6 6次盆地周缘地震的相对功率谱时序曲线

Fig. 6 Time-series curves of relative power spectrum for six earthquakes around basin

表2 地震相对功率谱时序曲线特征

Table 2 The features of time-series curves of relative power spectrum for six earthquakes

发震日期	地点	M_S	相对功率谱峰值	峰值出现时间	相对功率大于2的持续时间/d
2008-03-21	新疆于田	7.3	9.8	3月13日(震前8天)	105
2008-05-12	四川汶川	8.0	7.4	5月8日(震前4天)	81
2012-06-30	新疆新源	6.6	16.0	6月25日(震前5天)	75
2015-07-03	新疆皮山	6.5	13.8	8月25日(震后53天)	33
2017-08-08	四川九寨沟	7.0	11.5	8月2日(震前6天)	73
2017-08-09	新疆精河	6.6	13.5	8月1日(震前8天)	52

盆地周缘地震的热辐射异常时序变化，对地震短临预测的作用更显著一些。至于发震地点与其对应热辐射异常的位置关系，[邓志辉等\(2003\)](#)的研究认为强震震中常位于红外增温异常区域的边缘或附近，[张元生等\(2010\)](#)的研究也得出相似的结论，从本文中给出的6个震例([图5](#))来看，震中也均处在热辐射异常区域的边缘。

4 讨论与结论

对2017年8月8日四川九寨沟地震热辐射异常的研究结果显示：其空间展布与龙门山断裂带走向一致，主要分布在四川盆地边缘，与汶川地震前热辐射异常的展布特征相似，热辐射异常面积最大可达 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，地震发生在增温区域的边缘；其时序演化特征显示，相对功率谱幅值于7月初迅速升高后，长时间处于高幅值状态，震前最后一次峰值为均值的11.5倍，尽管有所转折，但幅值均在9倍以上，出现3次波峰值后发震，与最后一次波峰之间相隔6天；7月之前，两组相对功率谱背景值和标准差曲线各自几乎完全重合，7月之后，由于九寨沟地震的发生，两组背景值和标准差数据明显偏离，即九寨沟地震的相对功率谱幅值与过去十年的数据相比较为突出。

文中通过6个震例分析了盆地周缘地震的热辐射异常与盆地的相关性，从各震例所对应的热辐射异常面积来看，盆地一侧的面积占比均超过50%，其中于田、皮山及精河地震的占比更是高达100%，似乎异常面积越大，处于盆地内部的异常占比也越高。为了说明地震盆地效应的可能性，文中分析了自2008年以来四川和新疆盆地内的热辐射异常变化情况，结果显示研究区域内共出现8次类似盆地形态的异常，对应于盆地周缘 $M_S \geq 6.5$ 的地震，共8个震例中的6次地震存在此类异常，占比为75%。这一结果表明地震盆地效应具有一定可信度。

地震盆地效应可以解释盆地周缘具有不同发震构造的地震却表现出类似的盆地形态异常。地震盆地效应是从盆地周缘地震的热辐射异常现象出发，为地震热红外成因机理积极寻求答案，这明确地支持了地球放气理论。尽管如此，目前对于热红外成因机理的认识尚处于探索阶段，后续仍需进行建模和定量化计算研究，以进一步推进此方面的工作。

感谢中国地震局兰州地震研究所张元生研究员提供了热红外数据分析计算软件。

参 考 文 献

- 陈梅花, 邓志辉, 马晓静, 陶京玲, 王煜. 2007. 断裂带内外温差法在震前红外异常研究中的应用[J]. *地震地质*, **29**(4): 863-872.
- Chen M H, Deng Z H, Ma X J, Tao J L, Wang Y. 2007. Application of the inside-outside temperature relation analysis method in study on satellite infrared anomalies prior to earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **29**(4): 863-872 (in Chinese).
- 陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 刘力强, 扈小燕, 任雅琼. 2014. 利用卫星遥感热场信息探索现今构造活动: 以汶川地震为例[J]. *地震地质*, **36**(3): 775-793.
- Chen S Y, Ma J, Liu P X, Liu L Q, Hu X Y, Ren Y Q. 2014. Exploring the current tectonic activity with satellite remote sensing thermal information: A case of the Wenchuan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **36**(3): 775-793 (in Chinese).
- 邓志辉, 王煜, 陈梅花, 唐方头, 楚全芝, 徐好民. 2003. 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*, **25**(2): 327-337.
- Deng Z H, Wang Y, Chen M H, Tang F T, Chu Q Z, Xu H M. 2003. Satellite infrared anomaly of several strong earthquakes in China mainland[J]. *Seismology and Geology*, **25**(2): 327-337 (in Chinese).
- 郭卫英, 单新建, 屈春燕. 2006. 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*, **29**(5): 736-741.

- Guo W Y, Shan X J, Qu C Y. 2006. Correlation between infrared anomalous and earthquakes in Tarim basin[J]. *Arid Land Geography*, **29**(5): 736–741 (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, 张旋. 2014. 汶川8.0级和仲巴6.8级地震中波红外热辐射异常[J]. 地球学报, **35**(3): 338–344.
- Guo X, Zhang Y S, Wei C X, Zhong M J, Zhang X. 2014. Medium wave infrared brightness anomalies of Wenchuan 8.0 and Zhongba 6.8 earthquakes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, **35**(3): 338–344 (in Chinese).
- 黄福林, 张训华, 夏响华, 强祖基, 贾常恭, 张英凯. 1998. 中国东部和海域低层大气甲烷及其同系物分布[J]. 科学通报, **43**(16): 1767–1771.
- Huang F L, Zhang X H, Xia X H, Qiang Z J, Dian C G, Zhang Y K. 1998. Distribution of methane and its homologues in low-layer atmosphere over eastern China and seas[J]. *Chinese Science Bulletin*, **43**(22): 1902–1908.
- 康春丽, 刘德富, 荆凤, 熊攀, 曹忠权. 2011. 大地震红外辐射异常信息时空特征分析[J]. 地球物理学进展, **26**(6): 1897–1905.
- Kang C L, Liu D F, Jing F, Xiong P, Cao Z Q. 2011. Study on the indication of infrared radiation prior to impending strong earthquakes[J]. *Progress in Geophysics*, **26**(6): 1897–1905 (in Chinese).
- 李青梅, 张元生, 吕俊强, 任家琪, 张丽峰, 张璇. 2015. 2014年10月7日云南景谷M_S6.6地震热红外异常[J]. 地震工程学报, **37**(4): 1007–1012.
- Li Q M, Zhang Y S, Lü J Q, Ren J Q, Zhang L F, Zhang X. 2015. Thermal infrared anomaly occurring before the Jinggu, Yunnan M_S6.6 earthquake on October 7, 2014[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **37**(4): 1007–1012 (in Chinese).
- 刘德富, 彭克银, 刘维贺, 黎令仪, 侯建盛. 1999. 地震有“热征兆”[J]. 地震学报, **21**(6): 652–656.
- Liu D F, Peng K Y, Liu W H, Li L Y, Hou J S. 1999. Thermal omens before earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **21**(6): 652–656 (in Chinese).
- 刘培洵, 刘力强, 陈顺云, 陈国强, 马瑾. 2004. 地表岩石变形引起热红外辐射的实验研究[J]. 地震地质, **26**(3): 502–511.
- Liu P X, Liu L Q, Chen S Y, Chen G Q, Ma J. 2004. An experiment on the infrared radiation of surficial rocks during deformation[J]. *Seismology and Geology*, **26**(3): 502–511 (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, 庖小燕, 刘培洵, 刘力强. 2010. 大陆地表温度场的时空变化与现今构造活动[J]. 地学前缘, **17**(4): 1–14.
- Ma J, Chen S Y, Hu X Y, Liu P X, Liu L Q. 2010. Spatial-temporal variation of the land surface temperature field and present-day tectonic activity[J]. *Earth Science Frontiers*, **17**(4): 1–14 (in Chinese).
- 强祖基, 徐秀登, 贾常恭. 1990. 热红外异常: 临震前兆[J]. 科学通报, **35**(17): 1324–1327.
- Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. 1991. Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes[J]. *Chinese Science Bulletin*, **36**(4): 319–323.
- 强祖基, 孔令昌, 王弋平, 李秋珍, 贾常恭, 徐秀登. 1992. 地球放气、热红外异常与地震活动[J]. 科学通报, **37**(24): 2259–2262.
- Qiang Z J, Kong L C, Wang Y P, Li Q Z, Dian C G, Xu X D. 1992. The earth exhaust gas is associated with thermal infrared anomaly and seismic activities?[J]. *Chinese Science Bulletin*, **37**(24): 2259–2262 (in Chinese).
- 强祖基, 贾常恭, 黄福林, 赵勇. 1994. 寻找油气富集带的遥感找矿新方法: 卫星热红外探测技术[J]. 科学通报, **39**(18): 1725–1726.
- Qiang Z J, Dian C G, Huang F L, Zhao Y. 1994. New remote sensing method of prospecting for petroleum zone of enrichment: Exploration-serving technique of satellite thermal infrared band[J]. *Chinese Science Bulletin*, **39**(21): 1822–1823.
- 强祖基, 贾常恭, 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): 564–574.

- Qiang Z J, Dian C G, Li L Z, Xu M, Ge F S, Liu T, Zhao Y, Guo M H. 1999. Atellitic thermal infrared brightness temperature anomaly image: Short-term and impending earthquake precursors[J]. *Science in China: Series D*, **42**(3): 313–324.
- 魏乐军, 郭坚峰, 蔡慧, 李海兵, 强祖基. 2008. 卫星热红外异常: 四川汶川 $M_S 8.0$ 级大地震的短临震兆[J]. *地球学报*, **29**(5): 583–591.
- Wei L J, Guo J F, Cai H, Li H B, Qiang Z J. 2008. Satellite thermal infrared anomaly: A short-term and impending earthquake precursor before the Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake in Sichuan, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, **29**(5): 583–591 (in Chinese).
- 温少妍. 2011. 地震构造区红外亮温背景场建立及异常提取方法研究[D]. 成都: 中国石油大学; 47–49.
- Wen S Y. 2011. *A Study on the Brightness Temperature Background Field Foundation and the Method for Extracting Anomalies of Thermal Infrared in Seismotectonic Area*[D]. Chengdu: China University of Petroleum; 47–49 (in Chinese).
- 吴立新, 李国华, 吴焕萍. 2001. 热红外成像用于固体撞击瞬态过程监测的实验探索[J]. *科学通报*, **46**(2): 172–176.
- Wu L X, Li G H, Wu H P. 2001. Experimental exploration to thermal infrared imaging for detecting the transient process of solid impact[J]. *Chinese Science Bulletin*, **46**(10): 872–877.
- 解滔, 郑晓东, 康春丽, 卢军, 马未宇. 2015. 2014年2月12日新疆于田 $M_S 7.3$ 地震热红外亮温异常分析[J]. *中国地震*, **31**(1): 101–109.
- Xie T, Zheng X D, Kang C L, Lu J, Ma W Y. 2015. Possible thermal brightness temperature anomalies associated with the Yutian, Xinjiang $M_S 7.3$ earthquake on February 12, 2014[J]. *Earthquake Research in China*, **31**(1): 101–109 (in Chinese).
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 程佳, 谭锡斌, 朱艾娴, 闻学泽. 2013. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. *地学前缘*, **20**(3): 11–20.
- Xu X W, Chen G H, Yu G H, Cheng J, Tan X B, Zhu A L, Wen X Z. 2013. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake[J]. *Earth Science Frontiers*, **20**(3): 11–20 (in Chinese).
- 张丽峰, 郭晓, 张璇, 魏从信, 秦满忠. 2016. 强震中波红外异常特征研究[J]. *地震工程学报*, **38**(6): 977–984.
- Zhang L F, Guo X, Zhang X, Wei C X, Qin M Z. 2016. Anomaly characteristics of medium-wave infrared data prior to strong earthquakes[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **38**(6): 977–984 (in Chinese).
- 张璇, 张元生, 魏从信, 田秀丰, 汤倩, 高见. 2013. 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. 2013. Analysis of thermal infrared anomaly before the Lushan $M_S 7.0$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(2): 272–277 (in Chinese).
- 张元生, 郭晓, 钟美娇, 沈文荣, 李稳, 何斌. 2010. 汶川地震卫星热红外亮温变化[J]. *科学通报*, **55**(10): 904–910.
- 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.
- Choudhury S, Dasgupta S, Saraf A K, Panda S. 2006. Remote sensing observations of pre-earthquake thermal anomalies in Iran[J]. *Int J Remote Sens*, **27**(20): 4381–4396.
- Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, Shilin B B. 1988. The earth's outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. *Proc Acad Sci USSR*, **301**(1): 67–69.
- Ouzounov D, Freund F. 2004. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data[J]. *Adv Space Res*, **33**(3): 268–273.
- Saraf A K, Choudhury S. 2003. Earthquakes and thermal anomalies[J]. *Geospat Today*, **2**(2): 18–20.
- Saraf A K, Rawat V, Das J, Zia J, Sharma K. 2012. Satellite detection of thermal precursors of Yamnotri, Ravar and Dalbandin earthquakes[J]. *Nat Hazard*, **61**(2): 861–872.
- Tramutoli V, Di Bello G, Pergola N, Piscitelli S. 2001. Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas[J]. *Ann Geophys*, **44**(2): 295–312.
- Tronin A A. 1996. Satellite thermal survey: A new tool for the study of seismoactive regions[J]. *Int J Remote Sens*, **17**(8): 1439–1455.
- Tronin A A, Biagi P F, Molchanov O A, Khatkevich Y M, Gordeev E I. 2004. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area[J]. *Phys Chem Earth A B C*, **29**(4/9): 501–506.