

孟亚飞, 孟庆岩, 周世健, 张颖. 2020. 基于卫星数据稳健分析技术统计分析新疆地区热异常与地震的关系. 地震学报, 42(2): 205–215. doi: 10.11939/jass.20190117.

Meng Y F, Meng Q Y, Zhou S J, Zhang Y. 2020. Extraction and analysis of seismic thermal anomalies in Xinjiang based on robust satellite techniques. *Acta Seismologica Sinica*, 42(2): 205–215. doi: 10.11939/jass.20190117.

基于卫星数据稳健分析技术统计分析 新疆地区热异常与地震的关系*

孟亚飞¹⁾ 孟庆岩^{2),†} 周世健³⁾ 张 颖²⁾

1) 中国南昌 330013 东华理工大学测绘工程学院

2) 中国北京 100101 中国科学院空天信息创新研究院

3) 中国南昌 330063 南昌航空大学

摘要 为探究地震活跃区内地震与热异常的关联性, 本文选取 2014—2018 年新疆地区发生的 $M_S \geq 4.0$ 地震作为研究对象, 利用卫星数据稳健分析技术从 MODIS 地表温度数据中提取出热异常, 并结合热异常特点及筛选方法分析得出: 研究区内提取出热异常 84 次, 发生在热异常窗口期内的地震 39 次, 占比 46.43%。地震与热异常的对应关系表现为, 随着地震震级增大, 通过热异常检测到的地震所占比例逐渐增大。当 $M_S \geq 5.8$ 时, 研究区的地震发生均与热异常相关, 当地震震级相同时, 塔里木盆地中线以北区域的相关性高于以南地区, 通过 Molchan 误差图表分析得出, $M_S 5.0$ 对应预警距离作为阈值的检测效果较好。

关键词 地震 热异常 卫星数据稳健分析技术(RST) 统计分析 地表温度(LST)

doi: 10.11939/jass.20190117 中图分类号: 314.2 文献标识码: A

Extraction and analysis of seismic thermal anomalies in Xinjiang based on robust satellite techniques

Meng Yafei¹⁾ Meng Qingyan^{2),†} Zhou Shijian³⁾ Zhang Ying²⁾

1) Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2) Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3) Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: In order to investigate the correlation between earthquake field and thermal anomalies in seismically active areas, this paper selects the main earthquakes that occurred in Xinjiang from 2014 to 2018 as the research object, and uses the MODIS land surface temperature data to extract thermal anomalies by the robust satellite techniques. The screening method analysis shows that 84 thermal anomalies were extracted in the studied area, 39 earthquakes occurred during the thermal anomaly window period, accounting for 46.43%. The corresponding relationship between the earthquakes and thermal anomalies in the studied area is shown as that the

* 基金项目 国家重点研发计划(2019YFC1509202)、国家高分辨率对地观测重大科技专项(05-Y30B01-9001-19/20-1)和四川省科技计划(2018JZ0054)联合资助。

收稿日期 2019-07-07 收到初稿, 2019-12-19 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: mengqy@radi.ac.cn



proportion of earthquakes detected by thermal anomalies gradually increases with the magnitude of the earthquake increasing. When the $M_S \geq 5.8$, the earthquakes in the studied area are related to thermal anomalies. When the magnitude of the earthquakes is the same, the earthquakes to the north of the central line of the Tarim basin and the correlation of thermal anomalies is higher than those to the south. Through the analysis of Molchan's error chart, it is found that the detection effect with the magnitude of $M_S 5.0$ corresponding to the early warning distance as a threshold is better.

Key words: earthquake; thermal anomaly; robust satellite techniques (RST); statistical analysis; land surface temperature (LST)

引言

地震热异常自二十世纪八十年代被前苏联科学家提出以来,地震研究人员不断探索,逐渐认识到红外遥感在地震监测、预测方面具有一定的优势,并得到了广泛应用(强祖基等, 1990, 1997; Valerio *et al.*, 2001; Saraf, Choudhury, 2005; 郭晓等, 2010; Yao, Qiang, 2012). 遥感热异常为地震研究开拓了新方向,我国研究人员在地震热异常提取方面开展了大量研究,不断尝试运用长波辐射、亮温、地表温度为代表的各参量,采用差值法、涡度法、小波功率谱法等多种方法对地震热异常进行提取分析(陈顺云等, 2006; Ma *et al.*, 2012; 郭晓等, 2010; 康春丽等, 2011; Zhang *et al.*, 2010; 刘军等, 2014; 魏从信等, 2018). 地震热异常研究按照热异常分析对象分为单个震例和区域长序列震例. 针对地震高发区域的地震分布特点,运用热异常提取方法探究地震活跃区的长时序震例,分析研究区地震与热异常可能存在的相关性,对于地震研究具有重要意义.

随着红外参量背景场的引入,热异常提取方法进一步发展,以热异常定量分析为主要判断依据(吴立新等, 2017),在遥感热异常提取中运用和发展了卫星数据稳健分析技术(robust satellite techniques, 缩写为 RST)、小波分析、涡度算法、功率频谱等多种方法,取得了较好的效果. RST 算法由 Valerio 等(2001)提出,在地震红外异常提取研究中得到广泛应用; Genzano 等(2009)使用 RST 算法基于欧洲第二代气象卫星(meteosat second generation, 缩写为 MSG)的红外波段数据提取了意大利阿布鲁佐地震的热异常; Eleftheriou 等(2015)基于 RST 算法提取了 2004—2013 年希腊地区长时序地震的热异常,验证和总结了热异常提取在长时序地震研究中的可行性及特点;宋冬梅等(2016)基于地表温度(land surface temperature, 缩写为 LST)数据运用 RST 算法分析汶川地震,以地表温度年趋势作为地震构造热异常提取的背景场,提取的热异常与断裂分布更为吻合,表明该方法在提取地震热异常应用中具有良好的适用性. 本文将基于 MODIS_LST 数据运用 RST 算法提取新疆地区长时序地震的热异常,以热异常与地震的时空关联性的判定条件为基础,探究热异常与地震的相关性,以期为新疆地区的地震监测提供参考.

1 研究区与数据选取

新疆地区位于亚洲大陆几大构造的交会地带,区内地形构造复杂,特殊的构造地质条件使该地区地震频发(冯先岳, 1985),对新疆人民的生命财产安全和区域经济发展造成了较大影响. 本文以新疆(32°N—47°N, 73°E—90°E)为研究区(图 1),将 2014—2018 年发生在新疆及

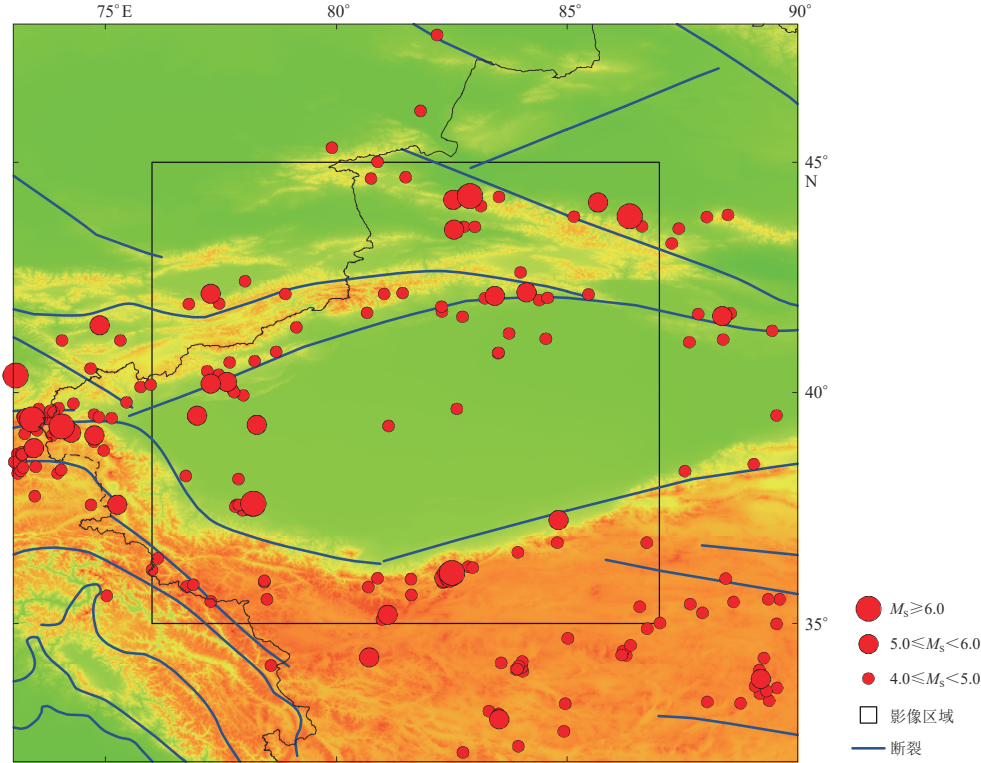


图1 2014—2018年新疆及周边地区 $M_S \geq 4.0$ 地震分布

Fig. 1 Distribution of $M_S \geq 4.0$ earthquakes in Xinjiang and its surrounding regions in 2014–2018

周边地震活跃区的251次 $M_S \geq 4.0$ 地震作为研究对象,其震级分布列于表1.在地震热异常提取中,以地表温度(LST)为代表的数据参量可较直接地反映出构造活动引起的热异常,LST数据已多次用于地震热异常提取(Filizzola *et al*, 2004; 宋冬梅等, 2016; Zhang, Meng, 2019).本文采用MODIS_MYD11A1

表1 2014—2018年新疆及周边地区 $M_S \geq 4.0$ 地震分布

Table 1 Distribution of $M_S \geq 4.0$ earthquakes in Xinjiang and its surrounding regions from 2014 to 2018

年份	$4.0 \leq M_S < 5.0$	$M_S \geq 5.0$	总计
2014	36	7	43
2015	50	8	58
2016	39	8	47
2017	32	3	35
2018	68	63	5

(USGS, 2011)夜间地表温度产品,选取Aqua卫星2002—2018年夜间地表温度作为背景场构建数据,主要探究热异常与地震的相关性,准确抓取热异常与附近地震存在相关性.选取(35°N—45°N, 76°E—87°E)为遥感影像区,采用Matlab, ArcGIS和Origin作为编程和数据分析平台,基于RST算法模型提取并分析可能与地震相关的热异常,进而探究两者相关性.

2 研究方法

卫星数据稳健分析技术(RST)是一种基于多时相数据的分析方法,该方法可以突出时空域上相对空间域的异常.RST模型由RAT(robust AVHRR techniques)模型演化而来,最初应用于云层动态、火山喷发、森林火灾等方面的监测(Tramutoli, 1998; Genzano *et al*, 2007).Tramutoli等(2005)改进了RAT算法并将其应用于地震前热红外监测,核心参数也由单一的

亮度温度演化出不同数据类型, 将其称之为 RST 方法. 随后各国学者利用该方法开展了大量震例研究, 并在多个震例中观测到明显的、持续的热红外异常现象(Filizzola *et al.*, 2004; Genzano *et al.*, 2015; 宋冬梅等, 2016). RST 以多年同期的遥感卫星数据为基础, 提取出相对背景场异常值, 公式如下:

$$R = \frac{\Delta T(x, y, t) - \mu_{\Delta T}(x, y)}{\sigma_{\Delta T}(x, y)}, \quad (1)$$

$$\Delta T(x, y, t) = T(x, y, t) - T(t), \quad (2)$$

式中, R 为热异常稳健估计值, $\Delta T(x, y, t)$ 为相对区域热异常均值的差值, $\mu_{\Delta T}(x, y)$ 为相同位置、相同时刻的 $\Delta T(x, y, t)$ 多年的平均值, $\sigma_{\Delta T}(x, y)$ 为对应的标准差, $T(t)$ 为 t 时刻影像均值. 由于在构建背景场所用到的数据中有大量的干扰噪声, 需对其进行进一步剔除:

$$A(x, y, t) = a_1(x, y, t) \cdot a_2(x, y, t), \quad (3)$$

式中: $A(x, y, t)$ 表示点位 (x, y) 在 t 时刻可否参与背景场构建的综合判定项; $a_1(x, y, t)$ 来判定点位 (x, y) 在 t 时刻是否为空值, 表示为

$$a_1(x, y, t) = \begin{cases} 1, & \text{云像元} < 80\%, \\ 0, & \text{其它}; \end{cases} \quad (4)$$

$a_2(x, y, t)$ 为点位 (x, y) 在 t 时刻可否用于构建背景场的判定项:

$$a_2(x, y, t) = \begin{cases} 1, & |V(x, y, t) - \mu_v(x, y)| < k\delta_v(x, y), \\ 0, & \text{其它}. \end{cases} \quad (5)$$

式中, $V(x, y, t)$ 表示 t 时刻点位 (x, y) 相元值.

$A(x, y, t)$ 用于排除构建背景场的干扰, $a_1(x, y, t)$ 用于剔除云层等干扰因素, MODIS_LST 数据云像元干扰而形成空值区域, 云覆盖区域过大可能导致数据不能反映区域均值, 故舍去云像元覆盖率大于 80% 的影像 (Carolina *et al.*, 2008); $a_2(x, y, t)$ 用于剔除空间异常值, $V(x, y, t)$ 时间序列中与均值之差大于 k ($k \geq 2$) 倍标准差的值, 不能用于构建背景场, 需予以剔除, 将 $a_2(x, y, t)$ 赋值为 0, 不断迭代至所有数值与均值之差小于 k 倍中误差 (Genzano *et al.*, 2009), 其方差为

$$\mu_{\Delta T}(x, y) = \frac{\sum_{t \in T} [\Delta T(x, y, t) \cdot A(x, y, t)]}{\sum_{t \in T} A(x, y, t)}, \quad (6)$$

进而得到其对应的标准差

$$\sigma_{\Delta T}(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{t \in T} [\Delta T(x, y, t) \cdot A(x, y, t) - \mu_{\Delta T}(x, y)]^2}{\sum_{t \in T} A(x, y, t)}}. \quad (7)$$

通过上述影像处理后, 筛选出符合构建背景场的数据, 可以有效地减少背景噪声的干扰, 计算出空间中每个像元相对于背景场的偏离程度 (Valerio *et al.*, 2001).

3 热异常提取与分析

3.1 地震热异常提取

新疆地区地表环境异常复杂, 导致地表温度出现异常的因素有多种, 故需利用下列判断条件进一步筛选出可能与地震相关的热异常(Eleftheriou *et al*, 2015):

- 1) 热异常稳健估计值 $R \geq 2$, 从统计学角度分析, 当 R 值大于标准差的2倍时, 即属于异常范畴(Filizzola *et al*, 2004), 本文阈值设置为2;
- 2) 热异常空间分布应当是聚集的, 检测出的异常分布需在经度 \times 纬度为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的范围内至少覆盖 150 km^2 ;
- 3) 时间分布上第一次出现热异常后, 在相邻或相同位置上, 七日内应至少再出现一次;
- 4) 可能与地震相关的热异常通常具有连续性, 出现热异常前15日或后30日内有地震发生;
- 5) 可能与地震相关的热异常与震中的距离 D 应小于 $10^{0.43M_s}$.

当满足条件1), 2)和3)时, 认为是可能与地震相关的热异常; 同时满足4)和5)时, 认为热异常与地震相对应.

运用RST方法处理遥感影像数据, 按照判断地震热异常条件筛选, 对新疆地区的热异常提取结果进行分析. 结果显示, 研究区内存在84次地震热异常, 其中在有效时空窗口内发生地震的热异常为39次, 占比为46.43%, 未发生地震的热异常为45次, 占比为53.57%. 对于热异常无法匹配的重要原因是不能满足条件4)和5), 即地震震中与异常出现位置相距较远, 或热异常出现的窗口期内未发生符合筛选条件的地震, 不能认为热异常与地震相关. 如图2所示, 虽然图2a中的地震出现在热异常的窗口期, 但热异常与震中距离无法满足条件5), 因此不能认为热异常与该次地震相关, 图2b则满足全部筛选条件, 认为热异常可能与此次地震相关.

由于研究区域范围较广, 单幅遥感影像可能检测出多次热异常, 提取出的热异常也可能

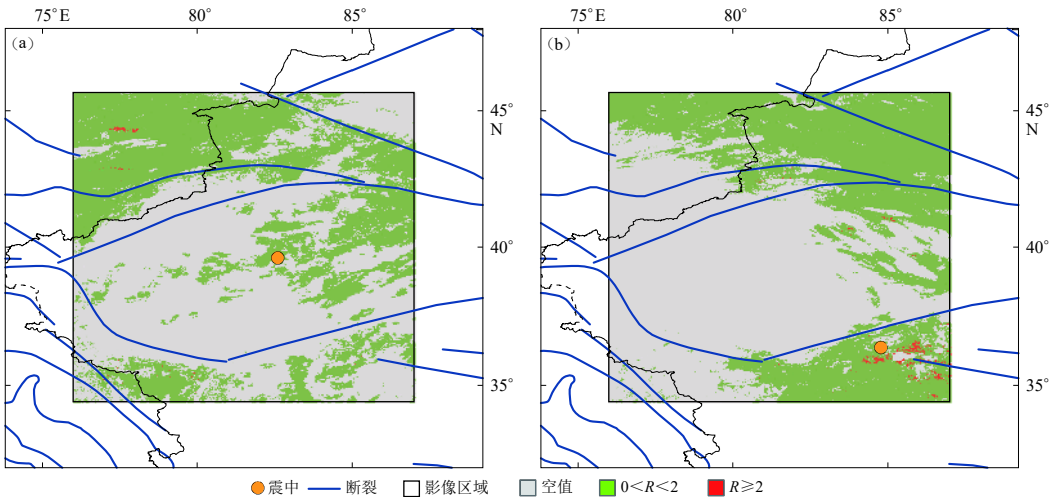


图2 地震震中与热异常空间分布

(a) 热异常与地震不相关; (b) 热异常与地震相关

Fig. 2 Spatial distribution of thermal anomaly and location of the epicenter

(a) Thermal anomalies are not related to the earthquake; (b) Thermal anomalies are related to the earthquake

与多次地震相关. 如图 3 所示, 2018 年 10 月 8 日检测到的热异常与两次地震有关, 其中 A 地震发生在异常出现后的 14 天; B 地震发生在异常出现前 14 天, 根据地震热异常筛选条件, 判断这两次地震均与研究区提取到的热异常有关.

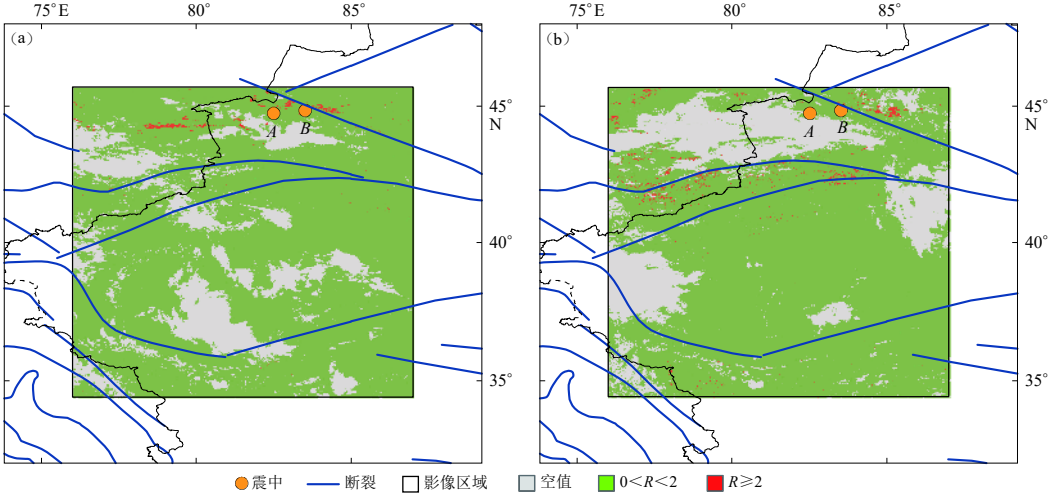


图 3 新疆地区 2018 年 10 月 8 日(a)和 2018 年 10 月 9 日(b)热异常与相关地震示意图
Fig. 3 Schematic diagrams of thermal anomalies and related earthquakes in Xinjiang on
October 8 (a) and 9 (b), 2018

3.2 地震热异常分析

所选研究时段内研究区共发生 $M_S \geq 4.0$ 地震 251 次, 被热异常检测到的共 46 次地震, 占比为 17.93%, 未被热异常检测到的 205 次, 占全部地震总数的 82.07%; 从震级上分, $M_S 4.0-5.0$ 地震为 219 次, 存在对应热异常的有 26 次, 不存在的有 193 次, 占比分别为 12.68% 和 87.32%, $M_S 5.0-6.0$ 地震共有 25 次, 与热异常相关的 11 次, 不相关的 14 次, 占比分别为 44.00% 和 56.00%; $M_S \geq 6.0$ 地震共 7 次, 全部存在对应热异常, 占比 100%. 这在某种程度上反映了地震震级越高, 被热异常检测到的概率越大.

为分析地震发生与有效热异常之间的时间分布特征, 对热异常前后的地震分布情况予以进一步分析. 结果显示, 不论震级大小, 仅在震前出现热异常的比例明显高于震前和震后同时出现或仅震后出现的情况. 如图 4 所示, 从震级上看, 随着地震震级增加, 仅震前出现热异常的比例逐渐上升, 在 $M_S \geq 5.0$ 和 $M_S \geq 6.0$ 的情况下, 热异常出现的比例均过半, 可达 53.30% 和 57.14%, 震前和震后同时出现热异常的相对较少, 仅震后出现热异常的比例最小.

为探究新疆地区基于 MODIS_LST 数据评估 RST 算法的地震预测潜力, 分析不同震级地震与热异常的相关性, 引入与地震相关热异常与总热异常之比 PPV (positive predictive value) 和与热异常相关地震与总地震之比 TPR (true positive rate):

$$PPV = \frac{TP1}{TP1 + FP}, \tag{8}$$

$$TPR = \frac{TP2}{TP2 + FN}, \tag{9}$$

式中, TP1 表示与地震相关的热异常, FP 表示与地震不相关的热异常, TP2 表示与热异常相关的地震数量, FN 表示与任何热异常不相关的地震. 各变量随着震级增大的变化如图 5 所示, 可见: 随着地震震级的增大, 检测到地震的热异常次数逐渐减少, 与地震无关的热异常相应增多(图 5a); 当 $M_S < 5.1$ 时, FN 值迅速降低, 在 $M_S = 5.1$ 时 FN 与 TP2 数值相等, 随后 TP2 值高于 FN 值, 热异常相关地震与热异常不相关地震的比值不断上升(图 5b); 而 PPV 值随震级增加而逐步减少, TPR 值整体不断增大(图 5c); 当震级 $M_S \geq 5.8$ 时, 热异常与地震均相关

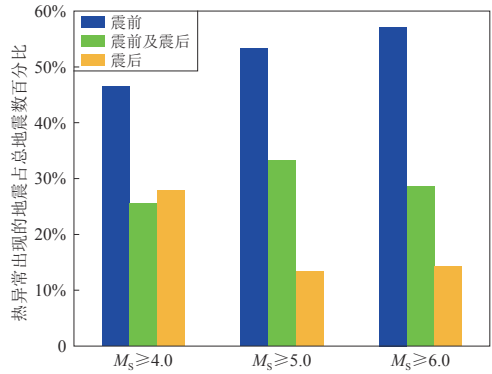


图 4 新疆地区 2014—2018 年地震发生时间与热异常统计

Fig. 4 Statistics of earthquake occurrence time and thermal anomalies in Xinjiang from 2014 to 2018

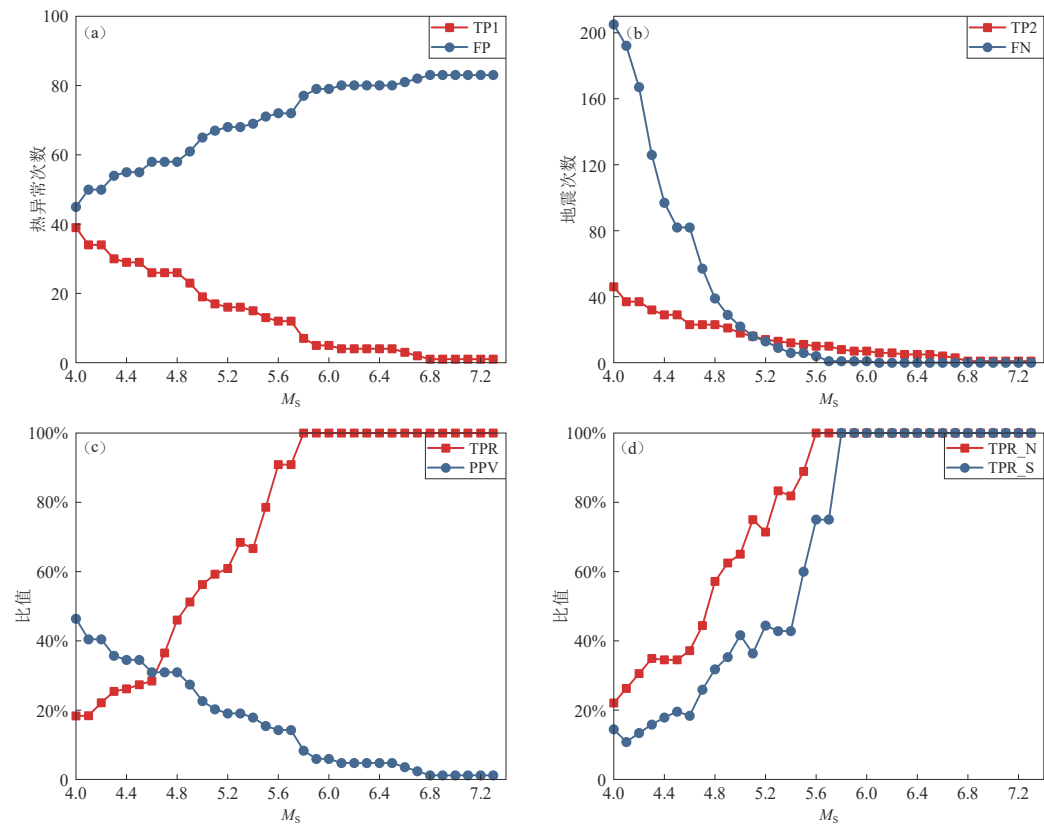


图 5 热异常与地震震级相关统计分析

(a) TP1 与 FP 对比; (b) TP2 与 FN 对比; (c) TPR 与 PPV 对比; (d) 塔里木盆地北侧 (TPR_N) 与南侧 (TPR_S) TPR 对比

Fig. 5 Statistical analysis of thermal anomalies and earthquake magnitudes

(a) Comparison of TP1 and FP; (b) Comparison of TP2 and FN; (c) Comparison of TPR and PPV;

(d) Comparison of TPR on the north (TPR_N) and south (TPR_S) parts of Tarim basin

(图 5d), 随着震级增大, 热异常相关地震占地震总数的比例不断增大, 进一步说明震级越高, 地震与热异常的相关度随之增加。

为分析研究区南北侧热异常与地震相关性差异, 将地震发生区域以塔里木盆地中线为界分为两个区域, 盆地北侧共发生地震 127 次, 南侧 124 次, 根据表 2 所示的统计结果, 盆地北侧被热异常检测到的地震 28 次, 未被热异常检测到的地震 99 次, 盆地南侧被热异常检测到的地震 18 次, 未被热异常检测到的地震 106 次, 各项统计指标随着震级不同而相应变化; 且随着震级增大, TPR 值均不断增大, 在相同震级区间, 盆地北侧相较盆地南侧 TPR 数值均较大。按照震级逐渐增加地震与热异常的相关性统计(图 5d), 在 TPR 达到最大值前, 盆地北侧的 TPR 在各个震级节点均比盆地南侧的 TPR 大, 可见盆地北侧地震与热异常的相关性相较南侧更高。

表 2 塔里木盆地北侧与南侧不同震级与热异常的相关性统计

Table 2 Statistics on the earthquakes with different magnitudes and thermal anomalies for the north and south parts of the Tarim basin

	塔里木盆地北侧区域			塔里木盆地南侧区域		
	FN	TP2	TPR	FN	TP2	TPR
$M_S \geq 4.0$	99	28	22.05%	106	18	14.52%
$M_S \geq 5.0$	7	13	65.00%	7	5	42.67%
$M_S \geq 6.0$	0	5	100%	0	2	100%

根据研究区的地震活动性、现代构造应力场、新构造活动及地质构造将新疆及毗邻的青藏高原地区划分为昆仑山地震区和天山地震区(陈建波, 2008)。昆仑山地震区包括帕米尔—西昆仑构造带和阿尔金构造带, 其中西昆仑山内的断裂形成早、规模大、深度大且多为继承性断裂, 具有发震频度高、地震强度大等特点。阿尔金构造带是新疆大陆内部的巨型活动断裂带, 新生代以来主要活动以左旋走滑运动为主, 第四纪以来天山构造变形以山前和山间盆地边缘的逆冲推覆为主(沈军等, 2001)。特殊的地理环境形成新疆地区降水有明显的地域

性, 降水北部多于南部, 西部多于东部(谢泽明, 2018)。研究区内南北两侧不同的地质构造和气候特征可能是导致地震与热异常相关性不同的原因。

3.3 Molchan 误差图表分析

Molchan 误差图表主要针对预测结果与观测目标地震差异度检验, 适用于广泛的地震预测领域(Molchan, 1990; 向阳等, 2018)。本文将提取出的热异常按照不同震级计算出地震的预警区域, 将提取出的热异常按照不同的震级所辐射距离预警得到相应的占比, 即通过热异常边缘以震级(如 $M_S=5.0$)对应的距离 D ($D=10^{0.43M_S}$) 为

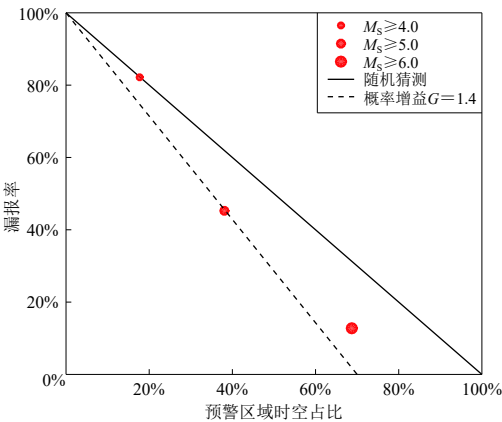


图 6 2014—2018 年新疆地区地震 Molchan 误差图表
Fig. 6 Molchan error chart of earthquakes in Xinjiang region in 2014–2018

半径作圆盘扫描, 所覆盖面积作为预警区域, 将 5 年内提取的热异常均重复上述步骤, 所获总预警区域面积之和与 5 年遥感影像之和的比值, 在热异常与地震存在相关性的时间窗口内, 通过搜索预警区域内相应震级地震, 经过统计得出相应震级地震的漏报率, 进而绘制 Molchan 误差图表, 如图 6 所示. 选用 $M_S 4.0$, $M_S 5.0$ 和 $M_S 6.0$ 对应的预警距离 D 作为阈值, 以热异常分布为中心, 分别在区域内搜索 $M_S \geq 4.0$, $M_S \geq 5.0$ 和 $M_S \geq 6.0$ 地震, 随着预警震级不断提高, 时空占比相应增大, 结合漏报率可知, 在所选研究区段内 $M_S 5.0$ 的预警能效较高.

4 讨论与结论

本文将新疆地区 2002—2018 年 MODIS_LST 数据作为背景场数据, 基于 RST 算法提取了 2014—2018 年研究区的地震热异常, 与研究区 $M_S \geq 4.0$ 地震及所提取出的热异常联合分析, 得出以下结论:

1) 基于 RST 算法提取出的热异常与新疆地区地震的匹配度为 46.42%. 虽然 RST 算法有较强的稳健性, 但新疆区地形复杂, 气象因素干扰较多, 可能导致自然和人类活动产生的热异常无法全部剔除, 进而使得提取的热异常与地震匹配度相对较低, 因此需进一步结合多源数据筛选出可能与地震相关的热异常.

2) 通过热异常与新疆地区地震序列分析可得: 随着震级的不断增大, 被热异常捕获的地震准确度也随之增高; 从震级分段统计分析, $M_S 5.0—6.0$ 热异常相关地震比例相比 $M_S 4.0—5.0$ 地震显著增加, $M_S \geq 6.0$ 与地震相关的概率为 100%; 随着震级逐渐增大, 热异常相关的地震与地震总数的比值不断增大, 热异常不相关地震迅速减少, 震级 $M_S \geq 5.8$ 时, 该区域地震均与热异常相关.

3) 将地震发生区分为塔里木盆地以北和盆地以南, 在同等震级情况下, 盆地北侧区域的地震与热异常的相关性相较南侧更高, 不同的地质结构和气候特征可能导致相关性的差异, 这对于新疆地区地震研究有着重要意义.

4) 通过运用 Molchan 误差图表法分析了热异常对于地震预警的能力, 得出新疆地区热异常以 $M_S 5.0$ 地震所对应的搜索距离作为预警阈值相对较好, 但结果分布均在随机猜测线附近, 不能排除热异常与地震的随机性, 因此仍需大量震例进一步分析.

综上所述, 本文基于 RST 算法提取了新疆地区遥感热异常, 总结了该区域地震与热异常的相关性, 对于地震与热异常的研究具有一定的参考价值. 限于新疆地区地震的统计数据, 热异常有效检测出地震的比例并不高, 仍需进一步针对特殊地理环境的热异常判别进行分析, 以提高热异常对于地震预警的精确度, 提升热异常对于特定区域的地震监测能力.

参 考 文 献

- 陈建波. 2008. 新疆地震构造特征研究 [D]. 北京: 中国地震局兰州地震研究所: 10–29.
- Chen J B. 2008. *Research on Seismotectonic Feature in Xinjiang* [D]. Beijing: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration: 1–29 (in Chinese).
- 陈顺云, 刘培洵, 刘力强, 马瑾, 陈国强. 2006. 地表热红外辐射的小波分析及其在现今构造活动研究中的意义 [J]. *地球物理学报*, 49(3): 824–830.
- Chen S Y, Liu P X, Liu L Q, Ma J, Chen G Q. 2006. Wavelet analysis of thermal infrared radiation of land surface and its implication in the study of current tectonic activities [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 824–830 (in Chinese).
- 冯先岳. 1985. 论新疆地震地质特征 [J]. *地震地质*, 7(2): 37–46.

- Feng X Y. 1985. Seismogeological characteristics of the Xinjiang area[J]. *Seismology and Geology*, 7(2): 37–46 (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).
- 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).
- 刘军, 刘小阳, 薄海光, 宗超, 马未宇. 2014. 基于引潮力附加构造应力调制的九江地震热异常时空动态过程研究[J]. *地震学报*, 36(3): 514–521.
- Liu J, Liu X Y, Bo H G, Zong C, Ma W Y. 2014. Spatio-temporal dynamic variation of thermal anomalies before and after the 2005 Jiujiang $M_{5.7}$ earthquake based on the modulation of additive tectonics stress induced by tide-generating force[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 36(3): 514–521 (in Chinese).
- 强祖基, 徐秀登, 赁常恭. 1990. 卫星热红外异常: 临震前兆[J]. *科学通报*, 35(17): 1324–1327.
- Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. 1990. Satellite thermal infrared anomaly: Precursor of imminent earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 35(17): 1324–1327 (in Chinese).
- 强祖基, 孔令昌, 郭满红, 王戈平, 郑兰哲, 赁常恭, 赵勇. 1997. 卫星热红外增温机制的实验研究[J]. *地震学报*, 19(2): 197–201.
- Qiang Z J, Kong L C, Guo M H, Wang G P, Zheng L Z, Dian C G, Zhao Y. 1997. An experimental study on temperature increasing mechanism of satellitic thermo-infrared[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 19(2): 197–201 (in Chinese).
- 沈军, 汪一鹏, 赵瑞斌, 陈杰, 曲国胜. 2001. 帕米尔东北缘及塔里木盆地西北部弧形构造的扩展特征[J]. *地震地质*, 23(3): 381–389.
- Shen J, Wang Y P, Zhao R B, Chen J, Qu G S. 2001. Propagation of Cenozoic arcuate structures in northeast Pamir and north-west Tarim basin[J]. *Seismology and Geology*, 23(3): 381–389 (in Chinese).
- 宋冬梅, 臧琳, 单新建, 袁媛, 崔建勇, 邵红梅, 沈晨, 时洪涛. 2016. 基于 LST 年趋势背景场的地震热异常提取算法[J]. *地震地质*, 38(3): 680–695.
- Song D M, Zang L, Shan X J, Yuan Y, Cui J Y, Shao H M, Shen C, Shi H T. 2016. A study on the algorithm for extracting earthquake thermal infrared anomalies based on the yearly trend of LST[J]. *Seismology and Geology*, 38(3): 680–695 (in Chinese).
- 魏从信, 张元生, 王莹. 2018. 日本 $M_{w9.1}$ 地震对区域热辐射背景场影响的时频分析[J]. *地震学报*, 40(2): 205–214.
- Wei C X, Zhang Y S, Wang Y. 2018. Time-frequency analysis of the influence of Japan $M_{w9.1}$ earthquake on regional thermal radiation background field[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 40(2): 205–214 (in Chinese).
- 吴立新, 秦凯, 刘善军. 2017. 断裂活动及孕震过程遥感热异常分析的研究进展[J]. *测绘学报*, 46(10): 1470–1481.
- Wu L X, Qin K, Liu S J. 2017. Progress in analysis to remote sensed thermal abnormality with fault activity and seismogenic process[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1470–1481 (in Chinese).
- 向阳, 孙小龙, 王博. 2018. 基于 Molchan 图表法的新疆流体资料预报效能检验[J]. *地震*, 38(3): 103–114.
- Xiang Y, Sun X L, Wang B. 2018. Earthquake prediction efficiency testing of observed fluid data in Xinjiang using Molchan diagram method[J]. *Earthquake*, 38(3): 103–114 (in Chinese).
- 谢泽明. 2018. 新疆降水的水汽来源特征分析研究[D]. 成都: 成都信息工程大学: 8–13.
- Xie Z M. 2018. *Analysis of Characteristics of Water Vapor Sources in Xinjiang Precipitation*[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology: 8–13 (in Chinese).
- Carolina A, Rosita C, Carolina F, Nicola G, Nicola P, Valerio T. 2008. Robust TIR satellite techniques for monitoring earthquake active regions: Limits, main achievements and perspectives[J]. *Ann Geophys*, 51(1): 303–317.
- Eleftheriou A, Filizzola C, Genzano N, Lacava T, Lisi M, Paciello R, Pergola N, Vallianatos F, Tramutoli V. 2015. Long-term RST analysis of anomalous TIR sequences in relation with earthquakes occurred in Greece in the period 2004–2013[J].

- Pure Appl Geophy*, **173**(1): 285–303.
- Filizzola C, Pergola N, Pietrapertosa C, Tramutoli V. 2004. Robust satellite techniques for seismically active areas monitoring: A sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake[J]. *Phys Chem Earth*, **29**(4/5/6/7/8/9): 517–527.
- Genzano N, Aliano C, Filizzola C, Pergola N, Tramutoli V. 2007. A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj-Gujarat earthquake[J]. *Tectonophysics*, **431**(1/2/3/4): 197–210.
- Genzano N, Aliano C, Corrado R, Filizzola C, Lisi M, Mazzeo G, Paciello R, Pergola N, Tramutoli V. 2009. RST analysis of MSG-SEVIRI TIR radiances at the time of the Abruzzo 6 April 2009 earthquake[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **9**(6): 2073–2084.
- Genzano N, Filizzola C, Paciello R, Pergola N, Tramutoli V. 2015. Robust satellite techniques (RST) for monitoring earthquake prone areas by satellite TIR observations: The case of 1999 Chi-Chi earthquake (Taiwan)[J]. *J Asian Earth Sci*, **114**(2): 289–298.
- Ma W Y, Wang H, Li F S, Ma W M. 2012. Relation between the celestial tide-generating stress and the temperature variations of the Abruzzo $M=6.3$ earthquake in April 2009[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **12**(3): 819–827.
- Molchan G M. 1990. Strategies in strong earthquake prediction[J]. *Phys Earth Planet Int*, **61**(1/2): 84–98.
- Saraf A K, Choudhury S. 2005. Cover: NOAA-AVHRR detects thermal anomaly associated with the 26 January 2001 Bhuj earthquake, Gujarat, India[J]. *Int J Remote Sens*, **26**(6): 1065–1073.
- Tramutoli V. 1998. Robust AVHRR techniques (RAT) for environmental monitoring: Theory and applications[C]// *Proceedings of SPIE* 3496, *Earth Surface Remote Sensing II*. Barcelona, Spain: SPIE: 101–113.
- Tramutoli V, Cuomo V, Filizzola C, Pergola N, Pietrapertosa C. 2005. Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaeli (İzmit) earthquake, August 17, 1999[J]. *Remote Sens Environ*, **96**(3): 409–426.
- USGS. 2011. Application for extracting and exploring analysis[EB/OL]. [2018–12–23]. <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>.
- Valerio T, Di Bello G, Pergola N, Piscitelli S. 2001. Robust satellite technique for remote sensing of seismically active areas[J]. *Ann Geophys*, **44**(2): 295–312.
- Yao Q L, Qiang Z J. 2012. Thermal infrared anomalies as a precursor of strong earthquakes in the distant future[J]. *Nat Hazards*, **62**(3): 991–1003.
- Zhang Y, Meng Q Y. 2019. A statistical analysis of TIR anomalies extracted by RSTs in relation to an earthquake in the Sichuan area using MODIS LST data[J]. *Nat Hazards Earth Syst*, **19**(2): 535–549.
- 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.