

孟庆岩, 卢显, 邵楠清, 申旭辉, 耿飞, 王园园. 2016. 地震红外背景场研究进展与示范区亮温背景场构建. 地震学报, 38(3): 438–447. doi:10.11939/jass.2016.03.011.

Meng Q Y, Lu X, Shao N Q, Shen X H, Geng F, Wang Y Y. 2016. Research progress in earthquake infrared background field and brightness temperature background field foundation of the demonstration areas. Acta Seismologica Sinica, 38(3): 438–447. doi:10.11939/jass.2016.03.011.

## 地震红外背景场研究进展与示范区 亮温背景场构建<sup>\*</sup>

孟庆岩<sup>1)</sup> 卢 显<sup>1,2),\*</sup> 邵楠清<sup>1,3)</sup>  
申旭辉<sup>4)</sup> 耿 飞<sup>1,3)</sup> 王园园<sup>1,5)</sup>

1) 中国北京 100101 中国科学院遥感与数字地球研究所

2) 中国北京 100045 中国地震台网中心

3) 中国南京 210044 南京信息工程大学大气物理学院

4) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

5) 中国山东青岛 266590 山东科技大学测绘科学与工程学院

**摘要** 本文综合阐述了国内外红外背景场的研究进展,进而基于 2010—2013 年 FY-2E 卫星热红外亮温数据构建了首都圈和甘青川交界地区的亮温背景场,并对其时空演化特征予以分析.研究表明,红外亮温背景场时间上主要受季节变化影响,空间上主要受地形影响,为地震热异常的判定和识别提供了研究基础和依据.

**关键词** 卫星遥感 地震 热红外异常 背景场 首都圈 甘青川交界区

doi:10.11939/jass.2016.03.011

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>8

文献标志码: A

## Research progress in earthquake infrared background field and brightness temperature background field foundation of the demonstration areas

Meng Qingyan<sup>1)</sup> Lu Xian<sup>1,2),\*</sup> Shao Nanqing<sup>1,3)</sup>  
Shen Xuhui<sup>4)</sup> Geng Fei<sup>1,3)</sup> Wang Yuanyuan<sup>1,5)</sup>

1) Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology,  
Nanjing 210044, China

4) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

5) Surveying Institute of Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,  
Shandong Qingdao 266590, China

**Abstract:** The construction and analysis of thermal infrared background field can

<sup>\*</sup> 基金项目 高分辨率对地观测系统重大专项(31-Y30B09-9001-13/15)、国家自然科学基金(41471310, 41201349)和中科院卓越中心亚洲减灾课题(Y3Y12702KB)共同资助.

收稿日期 2015-10-19 收到初稿, 2016-02-22 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: luxian@radi.ac.cn



effectively improve the recognition of thermal anomaly before an earthquake. This paper comprehensively discusses the research progress of thermal infrared background field, and then uses China's FY-2E satellite thermal infrared brightness temperature (TBB) data of 2010—2013 to construct the TBB background field of the Capital region and Gansu-Sichuan-Qinghai border region, and the spatio-temporal evolution characteristics of TBB background fields for the two regions are analyzed. The results show that, TBB background field is mainly affected by seasonal variation in time and by terrain in space. The results provide research foundation and basis for the judgement and identification of thermal anomaly for earthquakes.

**Key words:** satellite remote sensing; earthquake; thermal infrared anomalies; background field; Capital region; Gansu-Sichuan-Qinghai border region

## 引言

地震是人类面临的重大自然灾害之一,我国更是全球陆内地震活动最严重的国家,我国境内地震具有活动频度高、强度大、分布广、震源浅等特点(罗灼礼等,1997),因此,加强地震科学研究以支撑监测预报至关重要。20 世纪末,震前地表热异常被证实并陆续开展研究,取得了一些成果(强祖基等,1990;徐秀登等,1991,1992)。随着遥感技术的快速发展,海量时空连续的红外遥感数据为多时空尺度震前热异常分析奠定了良好的基础。而震前热异常是相对背景信息而言,作为由季节更替、地理位置、下垫面、天气变化等非震因素叠加的热红外背景噪声,背景场是区别地震异常的判断标准(孟庆岩等,2014),是判定地震异常的前提和基础。因此,红外背景场研究对开展地震前兆研究和监测预测具有重要意义和实用价值。本文拟系统介绍红外背景场的构建方法,总结其研究现状,并采用我国静止气象卫星数据构建首都圈和甘青川交界地区的月、季、年红外亮温背景场,研究其时空演化特征,以期为红外背景场构建与研究提供参考。

## 1 地震红外背景场研究进展

### 1.1 红外背景场研究现状

震前热异常现象被证实后,地震热异常研究陆续展开,一般通过计算震前数月或数日的红外参量场与红外背景场的差值提取异常,间接地促进了红外背景场研究。

目前,红外背景场的构建主要采用均值法,即基于多年历史数据取均值,进而分析其时空演变特征。陈顺云(2006)基于 1981—2001 年美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration,简称为 NOAA)发布的地表亮温数据,采用小波分析方法,提取了地表亮温年变基准场,并与传统均值法对比,认为该方法构建的基准场离散度更小。马晓静(2008)以 2000—2001 年 GMS-5 各月高值和月均值构建中国大陆地区的亮温背景场,并分析其时空分布特征,提出亮温梯度概念来探讨月亮温差值与大地热流值的关系。荆凤等(2009)基于 1979—2008 年 NOAA 长波辐射月均值,构建中国及其周边地区的长波辐射月背景场,认为还需进一步对构造区域内的长波辐射特征进行细化分析。温少妍(2011)基于 NOAA 地表亮温数据,采用均值法构建首都圈和祁连山的旬、月、年亮温背景场,其结果显示亮温空间分布主要受地形地貌与断层控制。闫丽莉(2012)基于中分

分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, 简称为 MODIS)和先进的微波扫描辐射计(advanced microwave scanning radiometer, 简称为 AMSR)所获取的数据, 采用均值法分别构建了川滇地区红外亮温和微波亮温月背景场, 并研究二者的定量关系, 某种程度上弥补了因云雨天气无法获取红外亮温而产生的数据连续性差的问题。

利用均值法构建背景场在地震异常提取中的应用较广泛, 多采用长时间序列数据。例如: 陈梅花等(2006)使用了 1980—2003 年长达 23 年的地表潜热通量(surface latent heat flux, 简称为 SLHF)日值数据; Panda 等(2006)使用了 2000—2004 年 MODIS 地表温度数据; 李金平等(2008)选取 1995—1998 年长达 4 年的 NOAA 热红外数据; 荆凤等(2012)选取 2001—2011 年长达 11 年的 NOAA 长波辐射场。

由于数据量不足和异常提取方法不同等原因, 部分研究人员通过选取某时间点或某空间区域的热参量场作为基准背景场开展特定震例研究。康春丽等(2003)以昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震前平静期 2001 年 11 月 3 日 GMS-5 亮温场作为背景场, 采用差值法分析该地震前后的亮温变化。马未宇(2008)针对汶川地震, 根据天体引潮力周期提取时间信号, 将天体引潮力由正值转为负值的当天美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, 简称为 NCEP)温度场作为背景场开展研究。陈梅花等(2007)针对 2000 年姚安  $M_s 6.5$  地震, 采用断裂带内外差值法, 以断裂带外 15—30 km 亮温场均值作为参考背景, 将断裂带 15 km 内的亮温场作为地震热异常区, 对二者进行差值提取异常。

综上所述, 国内外研究人员基于地表温度、亮温、长波辐射、潜热通量、NCEP 资料, 多以长时间序列均值作为背景场, 但也有以震前某平静期, 或以空间邻近地震活动区的相对平静区的热参量场作为背景场, 运用差值法提取震前热异常信息, 用以研究震前热异常与地震的时空关系。

## 1.2 红外背景场研究现存不足

尽管红外背景场研究已引起一定重视, 但在背景场构建尺度、理论分析及数据广度等方面的关注尚不足。构建尺度上, 以往的红外背景场研究多针对较大时空尺度分析其宏观特征, 精细尺度分析相对较少, 缺少针对具体研究区域时空演变特征的系统分析, 且多时间尺度分析不够, 使背景场特征研究难以深入。理论分析上, 红外背景场影响因子体系尚不系统, 也不成熟, 其影响机理研究不多, 特别是针对下垫面具体特征、大气运动等因素分析不足, 尚未形成一套成熟的真实性检验技术流程, 导致背景场在地震异常提取中的应用程度不够。数据广度上, 目前红外背景场数据源主要为 NOAA 和 MODIS, 国产卫星数据应用较少, 缺乏多源数据的融合和对比分析。

综上, 亟需强化基于多源数据的多时空尺度红外背景场构建研究, 综合多因子建立其影响因子体系, 加强影响机理研究。本文将针对以上问题, 利用 4 年 FY-2E 卫星数据, 构建首都圈和甘青川交界地区两个地震危险区不同尺度的红外亮温背景场, 并初步探讨其时空演化特征。

## 2 亮温背景场构建方法

### 2.1 数据

我国 FY-2E 静止气象卫星于 2008 年 12 月成功发射, 其有效观测范围为  $60^{\circ}\text{S}$ — $60^{\circ}\text{N}$ ,  $45^{\circ}\text{E}$ — $165^{\circ}\text{E}$ , 其亮温数据从 2009 年底对外发布, 空间分辨率为 5 km。

由于白天的太阳辐射对地表亮温的观测数据影响较大，因此本文选取 24:00—4:00 时段内 5 个整点的观测资料进行研究. 在亮温背景场构建之前，首先根据数据格式完成投影和插值计算，再用补窗法对每个像元进行简单去云处理，以保证亮温背景场计算结果能真实地反映无震时期的亮温正常变化规律. 本文采用 2010 年 1 月 12 日—2013 年 12 月 30 日的亮温数据，预处理完成后共得到 1385 个数据文件.

2.2 亮温背景场构建

构建研究区域连续多年的红外亮温背景场，对该区域震前亮温异常提取十分重要. 本文基于 4 年 FY-2E 静止卫星红外夜间亮温数据，计算首都圈和甘青川交界区不同时间段的亮温均值作为背景场表征量. 亮温均值的表达式为

$$T(x, y, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} T_i(x, y, t), \quad (1)$$

式中， $T(x, y, t)$ 为 $(x, y)$ 处 $t$ 时刻 $N$ 年内的亮温辐射平均值， $N$ 为所用数据的时间长度， $T_i(x, y, t)$ 为研究区域点 $(x, y)$ 处第 $i$ 年 $t$ 时刻的辐射观测值.

应用该方法分别计算分析首都圈和甘青川交界区两个研究区的亮温背景场变化特征，具体计算结果包括月均值、季均值和年均值，构建方案如图 1 所示，在该构建基础上分析背景场变化规律和影响因素.

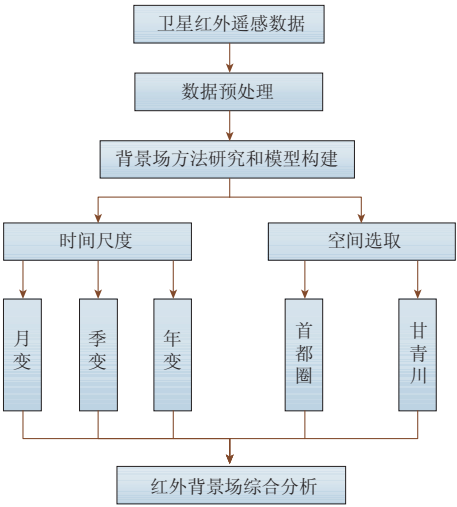


图 1 背景场构建方案

Fig.1 Background field construction

3 首都圈地区亮温背景场

3.1 研究区概况

首都圈地区(图 2)是位于华北地区拗陷盆地北缘的地震活动较强区域，在区域正断层控制的应力场作用下形成一系列盆-岭构造(韩月萍等，2009). 这些 NEE 向盆地和断裂分布最终形成了以燕山山脉隆起为背景面向华北平原沉降的格局(王若柏等，2004).

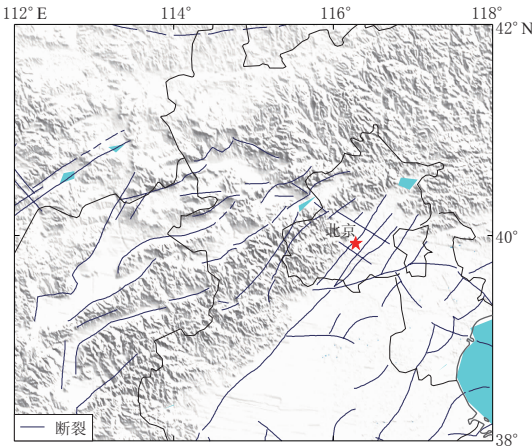


图 2 首都圈研究区及断裂分布

Fig.2 Capital circle region and faults

3.2 亮温背景场时空特征

2010—2013 年首都圈亮温月背景场主要受季节更替和地形变化的影响. 以 2013 年亮温月背景场为例(图 3)，首都圈亮温背景场总体表现为夏季高、冬季低的变化趋势，研究时段内 1—7 月亮温逐渐升高，至 8 月亮温值达到最高，而后逐渐降低直至 12 月. 上述亮温变化与季节变

化规律相符, 也符合当地气温值的变化规律. 空间上, 研究区东南部华北平原的亮温值明显高于西北部山区. 同时, 亮温值随地形海拔高度的增加逐渐降低, 表明亮温值与地表高程主要呈负相关. 此外, 如图 3 所示, 渤海湾水域温度偏高, 其变化幅度相对于华北平原较小, 而西北部山区的亮温变化随季节变化幅度最大, 这些现象均与地表热辐射特性一致.

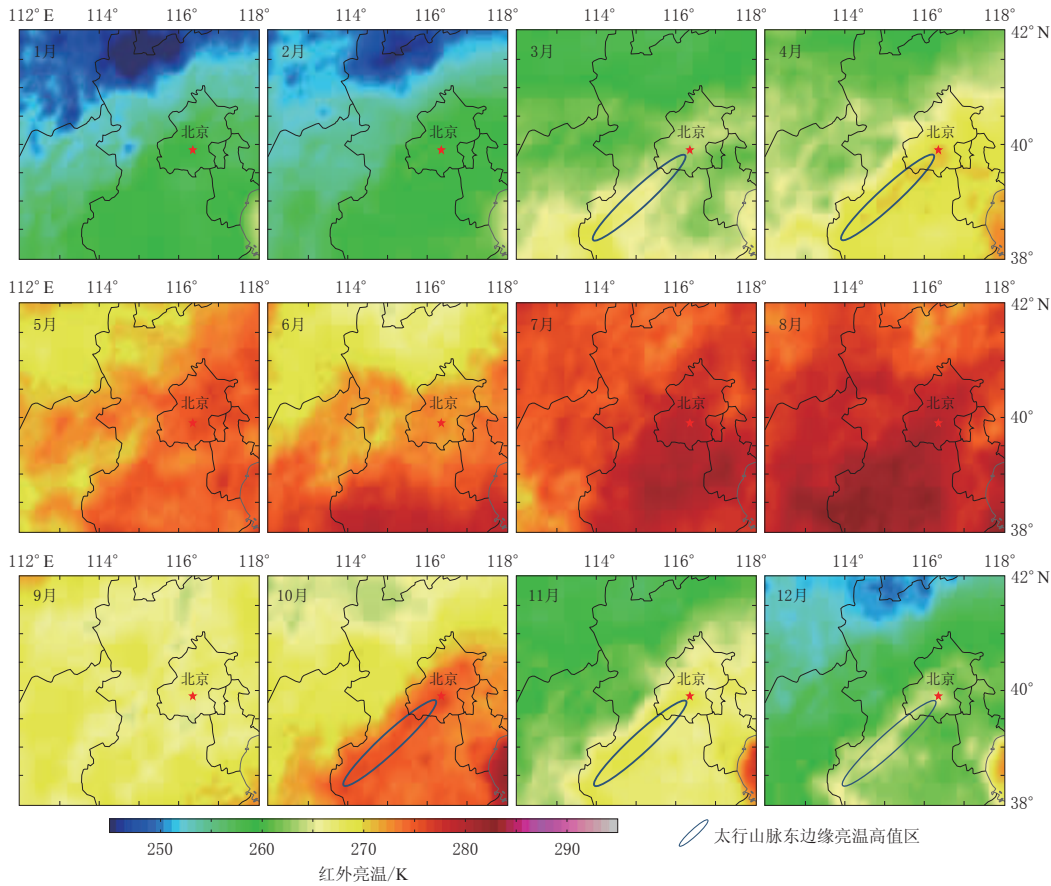


图 3 2013 年首都圈红外亮温月背景场

Fig. 3 Monthly background field of the brightness temperature of the Capital circle region in 2013

由图 3 所示的 2013 年红外亮温月背景场变化可以看出, 在 3, 4, 10, 11 和 12 月, 有一条区域红外亮温较周边区域略高, 该区域属于太行山脉东边缘, 海拔较高, 却呈现出与“亮温与高程呈负相关”这一规律相反的异常现象. 初步研究认为该区域地处华北平原与西北部山区交界, 偏西风带来的湿空气由于太行山脉的阻挡, 在爬坡过程中被迫抬升凝结水汽, 释放潜热, 并在山脉背风坡一侧下沉增温, 形成干燥高温的气流, 造成“焚风效应”, 从而导致该区域亮温异常增高.

图 4 给出了 2010—2013 年首都圈地区的亮温季背景场. 可以看出: 首都圈地区的季亮温值变化主要受地形和季节两因素控制, 从时间上总体表现为夏高冬低、春秋相似的年变特征, 这些现象均符合季节变化规律. 亮温值的高值区总体还是分布在东南部的华北平原, 西北山区的亮温值则普遍较低; 华北平原与太行山脉过渡的东边缘表现为明显高温带, 除夏季外均表现得较为明显.

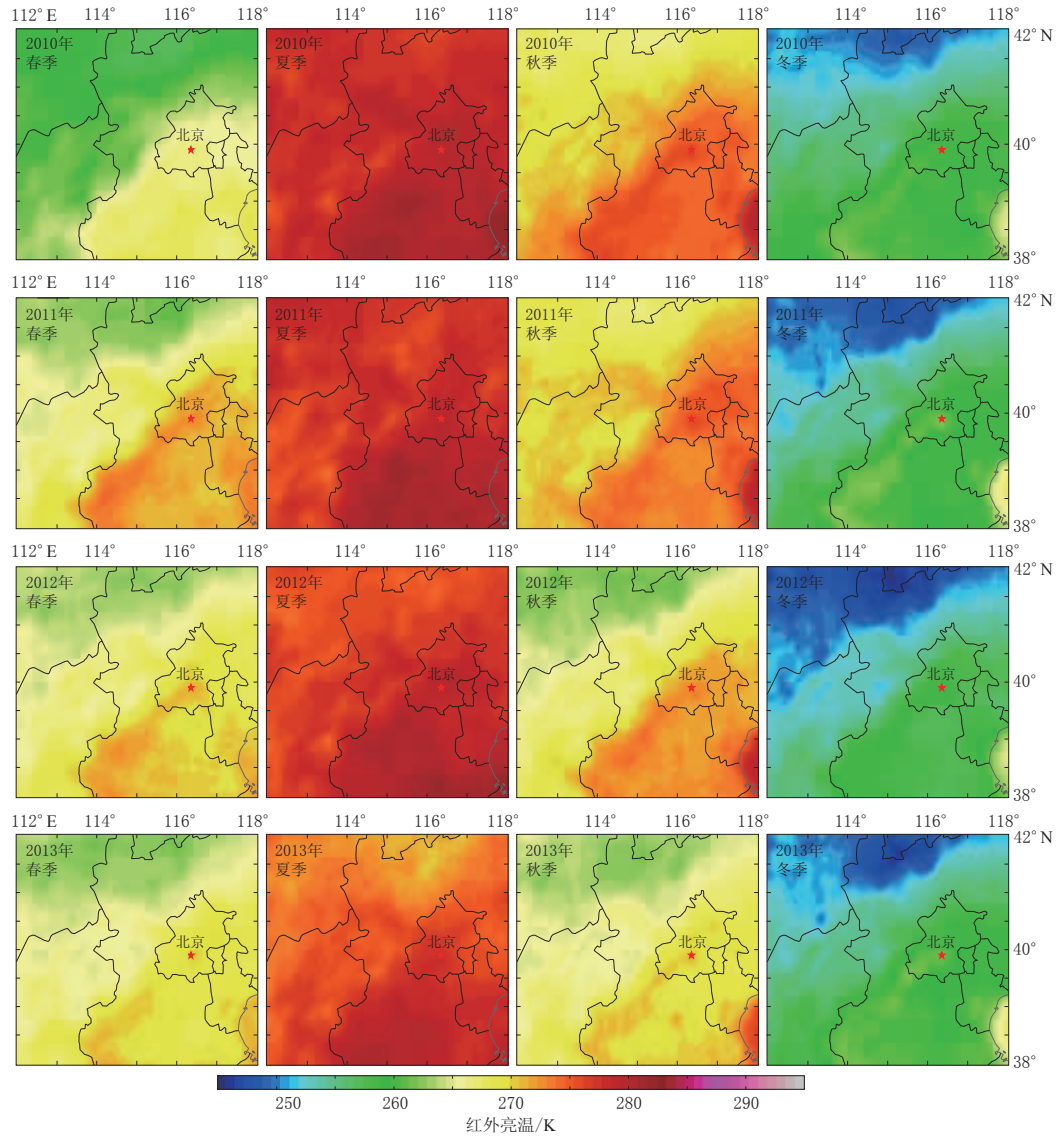


图 4 首都圈 2010—2013 年亮温季背景场

Fig. 4 The season background field of brightness temperature in the Capital circle region in 2010—2013

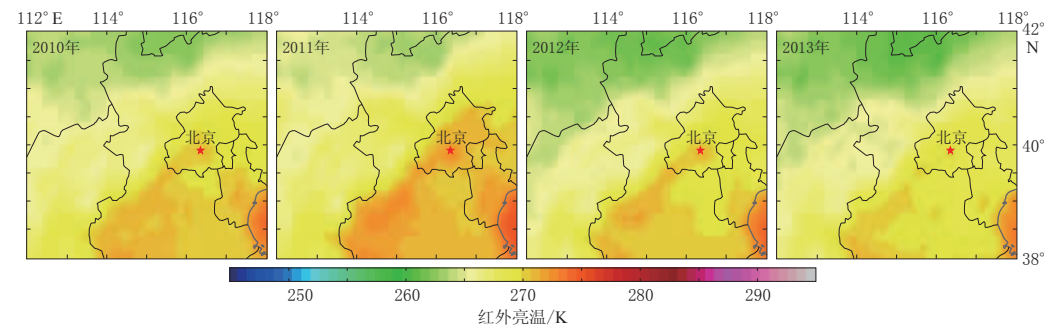


图 5 2010—2013 年首都圈历年亮温年背景场

Fig. 5 The annual background field of brightness temperature in the Capital circle region in 2010—2013



图 5 给出了首都圈地区 2010—2013 年的年平均亮温背景场. 可以看出: 亮温背景场变化与地形变化保持一致, 同时受断裂构造的影响也较为明显, 在红外背景场图中地物的地形、地貌清晰可见, 但在年平均背景场中一些信息被平滑掉了. 2010—2013 年亮温年背景场显示首都圈地区亮温在 2011 年最高, 2012 年和 2013 年温度值偏低. 这些均可对地震热异常的识别提供可靠依据和标准.

4 甘青川交界地区亮温背景场

4.1 研究区概况

甘青川交界地区(图 6)位于甘肃、青海与四川交界处, 是南北地震带中北段与库玛地震带的交汇区域(杨立明等, 2002), 其地质构造复杂, 强震活动频繁. 该区域位于青藏高原东缘, 属于甘青川交界菱形块体的上部分, 鲜水河断裂、龙门山断裂和安宁河断裂在此形成典型的“Y”字型地貌构造特征. 这种地质地貌蕴含了丰富的板块构造活动, NNE 向的

龙门山断裂带成为东南部四川盆地和西北部侵蚀高原的地势陡坡地带.

4.2 亮温背景场时空特征

图 7 给出了 2010—2013 年甘青川交界区亮温年背景场的变化. 可以看出: 亮温高值区位于四川盆地, 盆地边缘的沟谷水系也呈现亮温高值特性, 同时川西山地由于海拔高仍然是相对低温的区域; 地震频繁且地形复杂的龙门山断裂带则位于亮温高值区与亮温低值区的过渡地带.

图 8 给出了 2010 年甘青川交界地区亮温月背景场的变化, 可以看出其变化总体表现为: 东南部四川盆地为亮温高值区, 西北部则随海拔的升高, 亮温值逐渐降低; 10—12 月亮温值逐渐降低, 1—7 月亮温值逐渐升高, 符合季节变化规律, 最高亮温值出现在 7 月和 8 月.

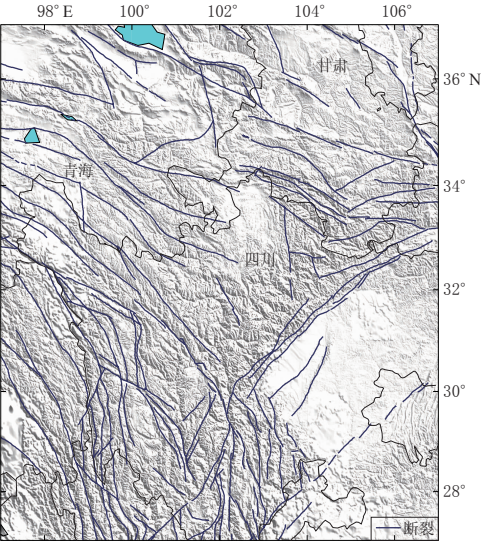


图 6 甘青川交界区范围及断裂分布  
Fig. 6 Gansu-Qinghai-Sichuan border region and faults

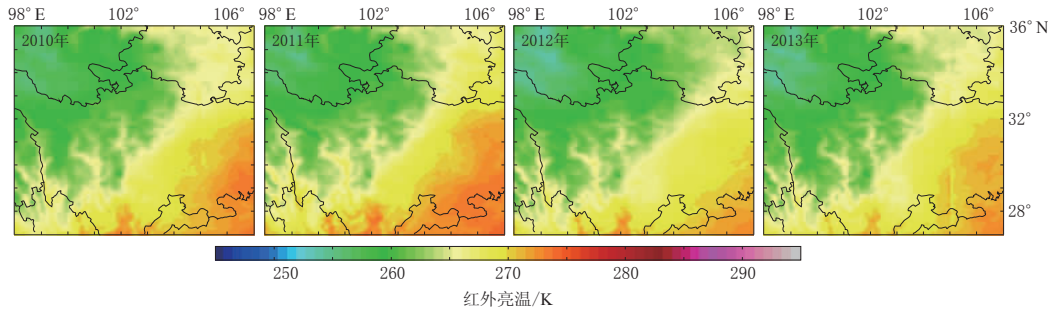


图 7 2010—2013 年甘青川交界亮温年背景场  
Fig. 7 The annual background field of brightness temperature in Gansu-Qinghai-Sichuan border region in 2010—2013

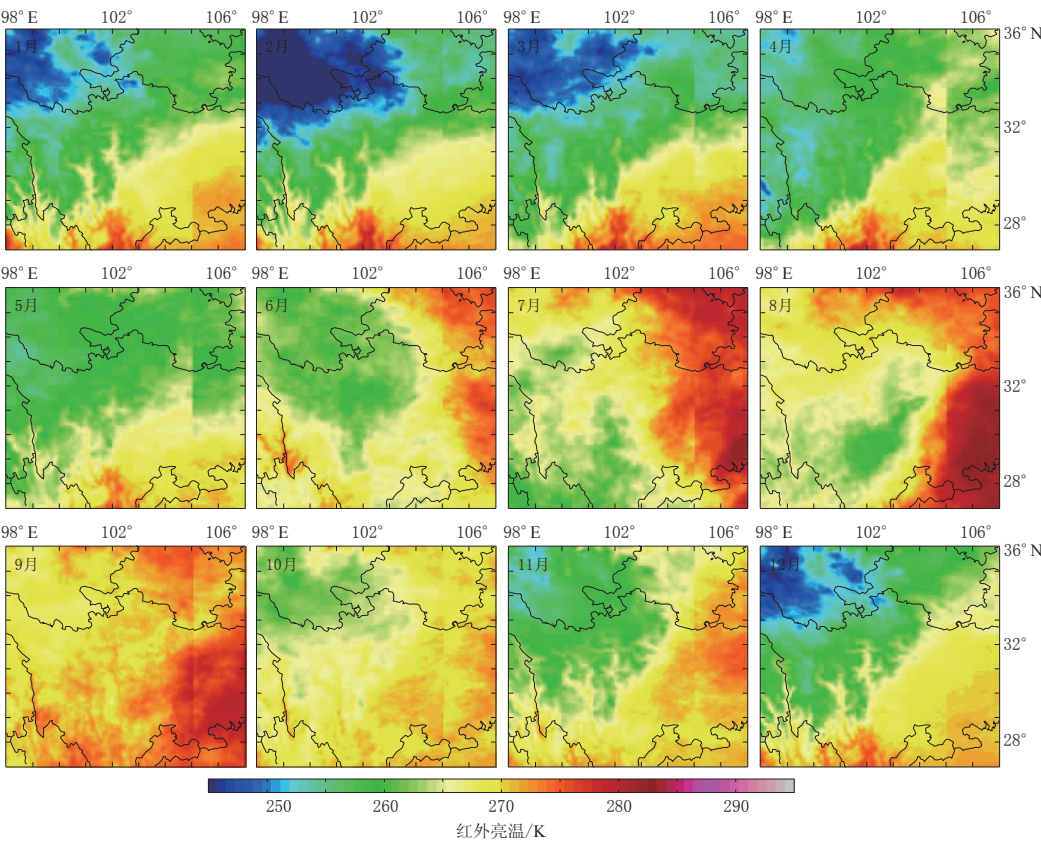


图 8 2010 年甘青川交界区亮温月背景场

Fig. 8 The monthly background field of brightness temperature in Gansu-Qinghai-Sichuan border region in the year 2010

5 讨论与结论

随着地震热异常研究的兴起，红外背景场的构建有了很大发展，但在数据完整性、方法成熟度、影响因子分析等方面仍有较大探索空间。基于此，本文基于我国 FY-2E 卫星数据，构建了首都圈和甘青川交界地区月、季、年亮温背景场，并对其时空动态演化特征予以分析。总体上，红外亮温背景场在时间上主要受季节更替控制，在局地空间上主要受高程控制；此外，其还与地区气象特征、沟谷水系、陆表海表等因素相关。亮温背景场的未来发展主要取决于遥感数据完整性的提高以及背景场构建方法的突破。细化而言，主要有以下几点：

- 1) 首都圈亮温背景场主要受季节更替和地形变化影响。历年 1—7 月的亮温背景场属于亮温值升高时段，8—12 月该值逐渐降低，与季节变化规律相符；东南部华北平原的亮温值高于西北部山区；渤海湾海域由于地表地物热辐射特性的差异，其亮温值随季节的变化相对东南部平原较小。
- 2) 首都圈地区在 3, 4, 10, 11 月和 12 月气温较冷的月份，太行山脉东边缘区域的亮温值比周边区域明显要高，以往研究认为此现象与断层构造有关，但考虑到该现象已持续



很长时间,因此本研究认为可能与地区气象特征有关。该区域位于华北平原与西北部山区的交界带,其亮温异常有可能是西风带系统由于太行山的阻挡作用所造成的焚风效应所致。

3) 甘青川交界地区亮温背景场的变化规律也符合夏高冬低的季节规律,其中高亮温区位于四川盆地,盆地边缘的沟谷水系也呈现高值亮温特性,同时川西山地由于其海拔高仍然是相对低温的区域,地震频发且地形复杂的龙门山断裂带则位于高温区与低温区的过渡区域。

结合红外背景场研究进展与本研究结果,本文认为红外背景场未来发展方向主要有两方面:一是充分发挥微波遥感的能力以克服云雨天气所导致的红外亮温数据不完整问题;二是深入探索背景场影响因子体系及其作用机理,创新背景场构建方法,构建模型并结合区域气候特征对背景场进行定量模拟,以克服气候变化等因素对背景场准确度的影响。

综上,构建准确可信的红外背景场是地震红外监测预测的前提和基础,宜从多学科交叉的角度认知地震热异常。通过对红外背景场物理演变规律的深入分析,剖析地震热异常与非震异常的差异,并在此基础上探讨其物理机制。这样,不断完善红外背景场构建方法和理论体系,建立多区域多时空尺度背景场库,从而使地震红外遥感在地震监测中发挥更大作用。

## 参 考 文 献

- 陈梅花, 邓志辉, 杨竹转, 马晓静. 2006. 2004 年印度尼西亚 9 级大地震前的潜热通量异常[J]. 科学通报, **51**(1): 118–120.
- Chen M H, Deng Z H, Yang Z Z, Ma X J. 2006. Anomaly of latent heat flux around the time of Indonesia earthquake M9.0, 2004[J]. *Chinese Science Bulletin*, **51**(1): 118–120 (in Chinese).
- 陈梅花, 邓志辉, 马晓静. 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. 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. 2006. 提取现今构造活动信息的定量热红外遥感方法研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 16–24.
- Chen S Y. 2006. *A Study on the Quantitative Thermal Infrared Remote Sensing Method for Extracting Information of Current Tectonic Activity*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 16–24 (in Chinese).
- 韩月萍, 杨国华, 董运宏, 塔拉. 2009. 首都圈地区现今地壳垂直形变特征[J]. 华北地震科学, **27**(1): 13–16.
- Han Y P, Yang G H, Dong Y H, Ta L. 2009. The current characteristics of vertical crustal deformation of the Capital region[J]. *North China Earthquake Sciences*, **27**(1): 13–16 (in Chinese).
- 荆凤, 申旭辉, 康春丽, 孟庆岩, 熊攀. 2009. 中国大陆地区卫星长波辐射背景场特征初步分析及震例研究[J]. 地震, **29**(10): 90–97.
- Jing F, Shen X H, Kang C L, Meng Q Y, Xiong P. 2009. Preliminary analysis of the background features of outgoing longwave radiation in China[J]. *Earthquake*, **29**(10): 90–97 (in Chinese).
- 荆凤, 申旭辉, 康春丽, 熊攀, 孙珂. 2012. 2010 年新西兰 M7.1 地震前的长波辐射变化特征[J]. 地球科学进展, **9**(9): 979–986.
- Jing F, Shen X H, Kang C L, Xiong P, Sun K. 2012. Variation of outgoing longwave radiation around the time of New Zealand earthquake M7.1, 2010[J]. *Advances in Earthquake Science*, **9**(9): 979–986 (in Chinese).
- 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 田勤俭, 刘德富. 2003. 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, **25**(1): 12–15.
- Kang C L, Chen Z W, Chen L Z, Tian Q J, Liu D F. 2003. Analysis on the satellite infrared anomaly feature before west to Kunlun Mountain Pass M8.1 earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **25**(1): 12–15 (in Chinese).

- 李金平, 吴立新, 刘善军, 马保东. 2008. 强震前热红外异常识别方法与定量分析模型[J]. 中国矿业大学学报, **37**(6): 808–813.
- Li J P, Wu L X, Liu S J, Ma B D. 2008. Pre-earthquake thermal infrared anomaly recognition method and quantitative analysis model[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, **37**(6): 808–813 (in Chinese).
- 罗灼礼, 丁鉴海, 刘德富, 魏家珍. 1997. 我国地震预报研究概述[J]. 地震, (3): 317–324.
- Luo Z L, Ding J H, Liu D F, Wei J Z. 1997. Review on earthquake prediction research in China[J]. *Earthquake*, (3): 317–324 (in Chinese).
- 马未宇. 2008. 汶川地震前的 NCEP 异常现象[J]. 科技导报, **26**(10): 37–39.
- Ma W Y. 2008. Abnormal phenomenon of NCEP before Wenchuan earthquake[J]. *Science & Technogy Review*, **26**(10): 37–39 (in Chinese).
- 马晓静. 2008. 中国大陆地震卫星热红外异常的亮温背景场研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 18–30.
- Ma X J. 2008. *A Study on the Brightness Temperature Background Field of Satellite Thermal Infrared Anomalies of Earthquakes in the China Mainland*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 18–30 (in Chinese).
- 孟庆岩, 康春丽, 申旭辉, 荆凤. 2014. 地震红外遥感[M]. 北京: 地震出版社: 74–95.
- Meng Q Y, Kang C L, Shen X H, Jing F. 2014. *Earthquake Infrared Remote Sensing*[M]. Beijing: Seismological Press: 74–95.
- 强祖基, 徐秀登, 贲常恭. 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, Lin C G. 1990. Satellite infrared thermal-anomaly: Earthquake imminent precursor [J]. *Chinese Science Bulletin*, **35**(17): 1324–1327.
- 王若柏, 顾国华, 徐杰, 周伟. 2004. 张家口—渤海地震构造带的地壳形变研究[J]. 地震地质, **26**(4): 586–596.
- Wang R B, Gu G H, Xu J, Zhou W. 2004. Discussion on characteristics of crustal deformation along the Zhangjiakou–Bohai seismotectonic zone[J]. *Seismology and Geology*, **26**(4): 586–596 (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]. 青岛: 中国石油大学(华东): 29–44.
- 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]. Qingdao: China University of Petroleum (East China): 29–44 (in Chinese).
- 徐秀登, 强祖基, 贲常恭. 1991. 临震卫星热红外异常与地面增温异常[J]. 科学通报, **36**(4): 291–294.
- Xu X D, Qiang Z J, Lin C G. 1991. Satellite thermal infrared and surface temperature anomaly before earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, **36**(4): 291–294 (in Chinese).
- 徐秀登, 强祖基, 贲常恭. 1992. 1976 年唐山地震前地面增温异常[J]. 科学通报, **37**(18): 1684–1687.
- Xu X D, Qiang Z J, Lin C G. 1992. Land surface temperature increasing anomaly before the Tangshan earthquake in 1976[J]. *Chinese Science Bulletin*, **37**(18): 1684–1687 (in Chinese).
- 闫丽莉. 2012. 卫星红外与微波亮温对比研究及在地震监测中的初步应用[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 19–27.
- Yan L L. 2012. *Comparison of Brightness Temperature Images From Satellite Remote Sensing of Infrared and Microwave and the Preliminary Application to Earthquake Monitoring*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 19–27 (in Chinese).
- 杨立明, 张勇, 张富芳. 2002. 甘东南甘青川交界地区中强地震前中等地震活动共性特征研究[J]. 高原地震, **14**(3): 1–8.
- Yang L M, Zhang Y, Zhang F F. 2002. Study on mutual features of middle earthquakes activities before middle-strong earthquakes in east-southern Gansu Province and its neighbor regions[J]. *Earthquake Research in Plateau*, **14**(3): 1–8 (in Chinese).
- Panda S K, Choudhury S, Saraf A K, Das J D. 2006. MODIS land surface temperature data detects thermal anomaly preceding 8 October 2005 Kashmir earthquake[J]. *Int J Remote Sens*, **28**(20): 4587–4596.