



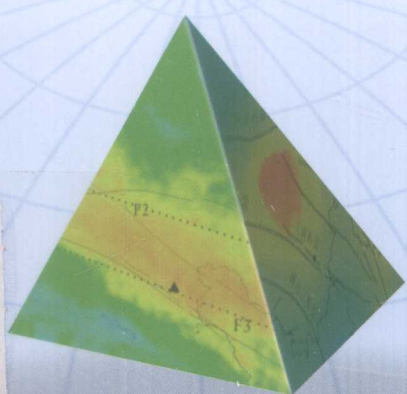
测绘地理信息科技出版资金资助
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

地球空间信息理论与应用丛书

地震遥感热异常 时空分析方法与检验

Thermal Anomalies Spatio-
Temporal Analysis for Seismicity:
Method and Verification

秦凯 吴立新 著



测绘出版社

江苏高校优势学科建设工程
测绘地理信息科技出版资金资助
地球空间信息理论与应用丛书

地震遥感热异常 时空分析方法与检验

Thermal Anomalies Spatio-Temporal Analysis for
Seismicity: Method and Verification

秦 凯 吴立新 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 中国矿业大学环境与测绘学院 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

利用卫星遥感技术开展地震前的热异常研究已经引起国内外学术界的广泛关注,被认为是实现地震短临预警的潜在途径。本书介绍了利用地表温度、近地表气温、热红外亮温、温度日较差、长波辐射、地表潜热通量等多个热参数开展地震遥感热异常研究的现状;针对亟须解决的关键问题,顾及地球系统多圈层耦合效应,提出了地震热异常分析的岩石层—盖层—大气层耦合理论框架,并建立了兼顾偏差—时间—空间关系的地震遥感热异常分析方法,提出了基于美国环境预报中心提供的最终全球分析资料的地震遥感热异常逐像元分析方法,检验了现代回顾性分析研究和应用分析资料(MERRA)的适用性与优势;此外,还辨析了红外亮温与线性云异常的关系,探索了地表潜热通量与电离层异常在中国西部地震前的准同步性。

本书可作为从事地震遥感异常识别研究的科学工作者、研究生的参考用书,同时也可作为地球物理、地质遥感等领域科研工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地震遥感热异常时空分析方法与检验/秦凯,吴立新著.—北京:测绘出版社,2016.1

(地球空间信息理论与应用丛书)

ISBN 978-7-5030-3554-8

I. ①地… II. ①秦… ②吴… III. ①地震监测-红外遥感
IV. ①P315.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 230369 号

责任编辑	宣 东	封面设计	李 伟	责任校对	王 波	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010-83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010-68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	三河市博文印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	7			字 数	141 千字		
版 次	2016 年 1 月第 1 版			印 次	2016 年 1 月第 1 次印刷		
印 数	0001-1000			定 价	43.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3554-8

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前 言

地震是当前最不可预知、破坏性最大的自然灾害之一,尤其是中强地震,将引起严重的人员伤亡和财产损失。孕震区在地震发生前会经历一个长期的能量积累过程,在孕震过程的后期,通过岩石层—盖层—大气层耦合效应,岩石圈应力增强将在局部的地表和大气层产生多种异常信号,热异常就是其中之一。经过 30 多年研究,国内外学术界通过大量震例研究对地震前卫星遥感监测到的热异常现象进行了反复检验和验证。近年来,全球综合地球观测系统(global earth observing system of systems, GEOSS)的发展为地震异常研究提供了海量对地观测数据。如何从中有效识别出构造活动异常信息并揭示其时空演变特征,是防灾减灾的重大需求。

本书针对地震遥感热异常研究中亟须解决的关键问题,介绍了使用地表温度、近地表气温、热红外亮温、温度日较差、长波辐射、地表潜热通量等多个热参数及卫星云图、电离层参数的地震遥感热异常分析与检验验证研究。全书共分为 5 章。第 1 章介绍了地震遥感热异常的研究背景及国内外研究现状。第 2 章参考现有的理论假说阐述了 LCA 耦合框架,提出了 DTS-T 方法的技术流程,并分析了 2010—2011 年新西兰地震前热参数和位移异常及其线性云异常耦合模式。第 3 章介绍了 3 种常用的同化数据集 NCEP/NCAR Reanalysis(美国环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合推出的再分析资料)、NCEP-FNL 及现代回顾性分析研究和应用分析资料(modern era retrospective-analysis for research and applications, MERRA),提出了地震遥感逐像元分析方法,并利用 MERRA 数据分析了 2012 年意大利艾米利亚地震前温度异常特征。第 4 章介绍了热红外遥感的基本理论、基本概念与当前主要的热红外传感器,阐述了 2010 年青海玉树地震前的红外亮温与线性云异常现象。第 5 章介绍了国外关于地震地表潜热通量与电离层异常时间同步性的研究,阐述了中国西部 4 次强震前地表潜热通量与电离层异常的时间同步性特征,讨论了可能的物理机理。

本书的内容是在自由探索以及之后国家自然科学基金项目(41401495)资助之下的成果汇总,有些已经在国际、国内学术会议进行交流,有些已经在有关学术期刊发表。本书的出版也得到了科技部“973 课题”(2011CB707102)及江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)的共同资助。此外,刘善军、李金平、马未宇、郭广猛等在本书主要内容写作中给予了帮助或进行了有益的讨论,郑硕、孟佳、仲晓红等在研究生学习期间参与了本书编写的部分工作,书中还引用了大量同行的文献,

在此一并表示感谢。

目前,地震遥感热异常研究处于快速发展之中,本书在编著过程中力求严谨,但也难免会存在争议及纰漏,希望能够抛砖引玉,不妥之处欢迎读者批评指出。

2015 年 11 月
于中国矿业大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展	3
第 2 章 多参数 DTS-T 方法与 LCA 耦合模式验证	13
2.1 LCA 耦合框架	13
2.2 多参数 DTS-T 方法	15
2.3 新西兰地震前多参数异常与 LCA 耦合模式	29
第 3 章 基于同化资料的地震温度异常时空特征分析	45
3.1 同化数据集介绍	45
3.2 基于 NCEP-FNL 数据的地震温度异常逐像元方法	51
3.3 基于 MERRA 数据的 2012 年意大利北部地震温度异常分析	58
第 4 章 基于 FY-2 数据的地震热红外与云异常分析	68
4.1 热红外遥感基础与数据	68
4.2 基于 FY-2 数据的 2010 年中国玉树地震前热红外与云异常分析	75
第 5 章 地震地表潜热通量与电离层异常的准同步性分析	86
5.1 背景介绍	86
5.2 中国西部地震前地表潜热通量与电离层异常	90
参考文献	98

Contents

Chapter1	Introduction	1
1.1	Research Context	1
1.2	Domestic and International Research Progress	3
Chapter2	DTS Method Based on Multi-parameters and Validation for LCA Coupling Models	13
2.1	LCA Coupling Frame	13
2.2	DTS-T Method Based on Multi-parameters	15
2.3	Multi-parameters Anomalies and LCA Coupling Models before New Zealand Earthquakes	29
Chapter3	Analyzing Pre-earthquake Temperature Anomalies Based on Assimilation Data	45
3.1	Assimilation Data Introduction	45
3.2	By-pixel Analsis Method for Pre-earthquake Temperature Anomalies Based on NCEP-FNL Data	51
3.3	Analyzing Temperature Anomalies before the 2012 Italy Earthquakes Based on MERRA Data	58
Chapter4	Analyzing Pre-earthquake Thermal Infrared and Cloud Anomalies Based on FY-2 Satellite Data	68
4.1	Fundamentals of Thermal Infrared Remote Sensing and Relevant Data	68
4.2	Analyzing Thermal Infrared and Cloud Anomalies before the 2011 Yushu Earthquake Based on FY-2 Satellite Data	75
Chapter5	Analyzing the Quasi-synchronization of Pre-earthquake Surface Latent Heat Flux and Ionospheric Anomalies	86
5.1	Research Context	86
5.2	Surface Latent Heat Flux and Ionospheric Anomalies Before the Eartqhaukes in China West	90
References		98

第1章 绪 论

1.1 研究背景

地震是对人类危害最严重、破坏性最大的突发性固体地理灾害之一。目前,全球正面临着新的地震活跃期,如2001年11月中国昆仑山口西8.1级地震、2004年12月印度尼西亚苏门答腊8.7级地震、2005年巴基斯坦7.8级地震、2008年3月中国于田7.3级地震、2008年5月中国汶川8.0级地震、2009年4月意大利拉奎拉6.3级地震、2010年1月海地太子港7.3级地震、2010年2月智利康塞普西翁8.8级地震、2010年4月中国玉树地震、2010年9月新西兰达菲尔德7.1级地震、2011年日本宫城9.0级地震等,均给人类造成了巨大灾难,一次又一次给全世界敲响了警钟。地震活动监测预警已成为维护国家公共安全和保持社会稳定最重要的内容之一,是目前亟待研究的重大问题。

地震前的热异常现象早已为国内外所关注。各国学者通过调查一些大地震前的异常情况,发现许多地震前都存在异常的气温变化。但由于当时缺少观测仪器或仅有少量的气象观测站,制约了地震热异常的深入研究。1988年,苏联科学家戈尔内(Gorny)等通过分析卫星红外图像发现,在中亚地震活动区的断层交汇部位,许多中强地震前均出现了短临的热红外辐射增强现象。其中最具有代表性的就是1984年3月19日加兹利地震前一周(即3月11日)在塔姆德—托克劳和塔拉斯—费尔干断层交汇部位出现的明显的热红外正异常,异常面积超过了10万 km^2 。这一发现使得利用卫星遥感技术快速获取大面积的地表温度场信息、捕捉震前热异常成为可能。

此后20多年,利用卫星遥感开展构造活动的热异常研究引起了学术界的广泛关注,大量的相关文献在国内外学术期刊中出现。尤其是2008年中国汶川地震之后,灾难性地震频发,相关研究明显增多。同时,各国学者从不同角度对地震热异常的物理机理进行了有益的探索,提出了气热说、应力致热、地下流体作用、空穴正电荷理论、氦气衰变释放潜热等各种假说,开展了混合气体增温实验、岩石受力至破裂过程中的红外及微波辐射观测实验研究。以上研究为地震热异常现象提供了可能的机理解释和实验证据。

30多年的地震热异常研究主要特点可以概括为:

(1) 跨学科交叉性。研究人员来自不同的学科领域(如地球物理与化学、

地震地质学、岩石力学、遥感、测绘、地理信息系统等)，如表 1.1 所示。

(2) 现象分析与机理探索同步。不同研究团队基于自身的学科背景分别从地震热异常现象的特征分析和背后隐藏的物理机理探索两个方面开展了大量的研究工作。

(3) 多源数据、多参数信息。来自地面观测、卫星遥感反演及同化资料的多源数据为地震热异常研究提供了多种参数信息（如地表温度、近地表气温、热红外亮温、长波辐射、潜热通量等）。

表 1.1 国内外从事地震热异常研究的主要团队

团队成员	所属机构	学科背景
特罗宁 (Tronin)	俄罗斯科学院生态保护研究中心	地球物理、地质
萨拉夫 (Saraf), 乔杜里 (Choudhury), 拉瓦特 (Rawat), 等	印度理工学院鲁尔基分校	遥感
乌祖诺夫 (Ouzounov)	美国查普曼大学 美国宇航局戈达德太空飞行中心	地球物理
弗罗因德 (Freund), 等	美国州立圣何塞大学 美国宇航局戈达德太空飞行中心	地球化学、 岩石力学
普利涅兹 (Pulinets), 等	俄罗斯耶多洛夫应用地球物理研究所	地球物理
特拉穆托利 (Tramutoli), 佩尔戈拉 (Pergola), 阿利亚诺 (Aliano), 等	意大利巴西利卡塔大学 意大利环境分析方法研究所	遥感
辛格 (Singh), 戴依 (Dey), 塞文 (Cervone), 等	美国查普曼大学	遥感、计算机
强祖基, 孔令昌, 徐秀登, 姚清林, 赁常恭, 等	中国地震局地质研究所 中国地震台网中心 中国气象局卫星气象中心 浙江师范大学	地震地质、 卫星气象学
马瑾, 刘培洵, 刘力强, 陈顺云, 屈春燕, 单新建, 邓志辉, 陈梅花, 等	中国地震局地质研究所	地震地质、 遥感
耿乃光, 邓明德, 崔承禹, 等	中国地震局地球物理研究所 中科院遥感应用研究所 中国地震应急搜救中心	地球物理、 岩石力学、 遥感
刘德富, 康春丽, 申旭辉, 荆凤, 熊攀, 等	中国地震局分析预报中心 (地震预测研究所) 中国地震台网中心	地震地质、 遥感

续表

团队成员	所属机构	学科背景
徐秀登, 马未宇, 张行才, 等	浙江师范大学	地震地质、 卫星气象学
吴立新, 刘善军, 吴育华, 李金平、 马未宇, 秦凯, 等	中国矿业大学 (北京) 东北大学 北京师范大学	测绘遥感、 GIS、地震地质
张元生, 钟美娇, 郭晓, 等	中国地震局兰州地震研究所	地震地质、 遥感
刘放, 等	中国地震局四川地震局	地震地质

1.2 国内外研究进展

1.2.1 现象与特征

1. 近地表气温

我国史料中很早就有强震前热异常现象的记载,如《滇南新语》中记载,清朝乾隆十六年(1751年)五月二十五日,云南剑川烦热而气昏惨无风,继而地震;1933年四川阿坝藏族羌族自治州叠溪镇7.5级地震前,出现了“连日皆极晴朗炎热”的热异常。这些记载多为主观感受,可靠性有待考证。20世纪80年代后,国内外学术期刊开始发表地面气象站记录到的震前气温异常文章。例如,赵洪声等(1984)通过逐日气象资料,研究了1956—1979年滇东地区12次5级以上地震前的地面气温的变化,发现不少震例震前震中区气温有升高的现象;苏联土库曼共和国的米尔克瑞斯分析了120多个地面气象站的观测资料,发现在中亚地区地震前存在气温异常现象,气温最大值一般出现在震前的1个月至1年内(中长期异常)或者几小时至一两天内(短临异常)(Mil'kis, 1986)。叶民权(1987)分析发现1985年8月23日乌恰7.4级地震前,7月份乌恰地区气温明显高于历年月均值。徐秀登等(1992)分析唐山大地震前(1976年6—7月)我国185个气象站的地表温度,发现震区及其外围135个台站震前皆呈现趋势性增温。徐秀登等(2000)分析气温资料认为,在1998年张北地震前几天,震区及其周围的增温异常是一种临震前兆。Pulinets等(2006, 2007)分析了墨西哥1985年米却肯(Michoacan)和2003年科利马(Colima)地震前的气温和日温异常情况。郭广猛(2010)用温度相减法研究1998年张北地震前的温度

变化,发现震前 13 天张北地区附近出现了孤立的增温区。

2. 卫星热红外亮温与地表温度

自从 1988 年戈尔内等在苏联科学院会议上发表《地球热红外辐射——地震活动性的标志》一文后,地震活动热异常研究进入了卫星遥感时代。此后 20 多年,俄罗斯、中国、美国、印度、意大利、日本等国家的学者通过大量的震例分析,检验证实了地震卫星遥感热异常现象的普遍性,并总结了地震前热红外异常规律性特征。

强祖基等(1998, 2008, 2009)认为:增温异常形态表现为孤立的圆状、椭圆状、带状及块状;异常幅度为 $2^{\circ}\text{C} \sim 6^{\circ}\text{C}$;地震震级与异常面积、幅度成正比;地震震中位置一般位于异常的随时间运动迁移的前缘或其前锋与地震带、活动构造带交汇区,或是孤立异常的凹陷部位;增温异常达到最大幅度后数天至两个月内发震。徐秀登等(1991b)认为:震级大于 5 级的地震前存在热红外异常;异常呈现突变性特征,一般在地震前 2~22 天内突然出现,并持续数日;地震震级与异常幅度、面积呈正相关,但无明确的定量关系;异常表现出多旋回性,即增温经高峰到平静期后并不发震,多次旋回后才发震。

Tronin 等(2002, 2004)认为:异常出现在地震前 6~24 天,并在地震后持续一周;空间分布与地震断裂区有紧密关系;异常幅度为 $3^{\circ}\text{C} \sim 6^{\circ}\text{C}$;异常面积达几百千米乘几十千米范围;异常出现在 4.7 级以上地震前。

吴立新等(2007)认为:异常一般出现在震前 1~26 天,震前 1~2 天达到最大幅度;异常幅度为 $2^{\circ}\text{C} \sim 13^{\circ}\text{C}$;异常区的面积和增温幅度与震级之间存在一定的正相关性;温度异常区的空间展布与构造位置关系密切,随地震临近,异常沿构造带向震中迁移、扩展。

此外,马瑾等(2006)认为地震是断层在构造应力作用下发生构造变形破裂的结果,但多数断层活动并不引发地震,了解断层活动是认识地震规律的基础,因此,需要从整体上开展断层活动、卫星红外异常及地震三者之间的关联性分析。他们利用极轨气象卫星 NOAA-AVHRR 红外亮温数据对中国西部断裂(如南北地震构造带、东昆仑断裂带、玛尼—玉树—鲜水河断裂带、阿尔金断裂带等)进行了研究。结果表明,与断层活动有关的地表亮温高值区往往与随后的强震活动区相符,增值时期往往与地震活跃期相符。

3. 长波辐射

射出长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)是指卫星遥感反演得到的地气系统向外层空间发射的电磁波($4 \sim 50 \mu\text{m}$)能量密度(又称为热辐射通量密度,单位为 W/m^2),其大小取决于云顶或无云地面的温度。长波辐射数据一般由气象卫星上搭载的红外通道辐射仪对地球和大气扫描观测后经过一定算法计算得到。目前,卫星遥感反演长波辐射主要有 3 种方法:①用极轨气象卫星

NOAA-AVHRR 通道 5 观测值计算长波辐射的单通道算法;②用静止卫星(如我国的 FY-2 系列卫星)红外和水汽通道观测值计算 OLR 的多通道算法;③用极轨气象卫星 NOAA-HIRS 通道 3、7、10、12 的观测值计算 OLR 的多光谱算法。刘德富团队首先将气象领域的 OLR 数据引入地震热异常研究中来,该研究引起了美国学者奥佐诺夫的关注,双方合作在国际学术期刊《Tectonophysics》上撰文介绍了 NOAA-AVHRR 的 OLR 产品详情以及使用该产品开展地震热异常研究的方法(Ouzounov et al, 2007)。

4. 地表潜热通量

地表潜热通量(surface latent heat flux, SLHF)反映了地气系统之间的水热交换,主要体现大气中水分的相变(凝结、蒸发、融化)所吸收或释放的热量,受大气相对湿度、风速及地表温度等影响。2003 年印度学者辛格(Singh)领导的研究团队在国际学术期刊《Natural Hazards and Earth System Sciences》上发表了题为《Surface latent heat flux as an earthquake precursor》的文章(Dey et al, 2003)。文章使用 NCEP/NCAR 再分析资料分析了印度、中国台湾和墨西哥的 5 次海洋地震与 2 次内陆地震前的潜热通量时空分布变化情况,发现 5 次海洋地震前 2~7 天在震中附近区域出现了大于背景值的高值,而 2 次内陆地震前无类似现象,但在震后出现了高值;认为可能是由于在远离海洋的地区,潜热传递滞后出现的时间延迟。随后,他们引入小波分析技术以剔除气象变化和地理因素的影响,提取与地震活动有关的潜热通量异常信息(Cervone et al, 2006),并应用于 2004 年印度尼西亚地震、2010 年海地地震的分析中(Singh et al, 2007, 2010)。中国地震局地质研究所邓志辉领导的团队与中国矿业大学吴立新领导的团队及时跟踪验证了这一新的发现。邓志辉团队研究发现 2004 年印度尼西亚地震、2010 年智利地震前的潜热通量异常与 Singh 团队的结果一致(陈梅花等, 2006, 2011),而 2005 年中国九江 5.7 级地震前潜热通量异常比地表温度异常滞后 2 天,原因可能是由于陆地热容量比水体小,陆地地面升温较快,而水体较多的区域地面升温较慢,导致潜热通量异常滞后(陈梅花等, 2007)。吴立新团队聚焦在中国大陆强震前的潜热通量异常变化,认为可能与震区附近的水体有关(李金平等, 2008b; 秦凯等, 2010, 2011)。此外,香港中文大学研究委员会基金资助香港中文大学太空与地球信息科学研究所开展了题为“Surface latent heat flux associated with coastal earthquake and typhoon intensification”的研究。

1.2.2 数据与方法

地震热异常研究中使用的多参数信息主要来自三种数据源(表 1.2),即同化资料、卫星遥感反演产品、地面观测。卫星遥感反演产品具有时空分辨率高的优点,但易受云雨等天气情况的影响,数据连续性较差。同化资料融合了各种观

表 1.2 常用的多源数据、多参数信息

热参数	数据源	时间范围	时间分辨率	空间范围	空间分辨率
地表温度/K	NCEP/NCAR Reanalysis	1948 年至今	6 h	全球	1.9°× 1.9°
	NCEP-FNL	1999 年至今	6 h	全球	1°× 1°
	MERRA	1979 年至今	1 h	全球	0.7°×0.5°
	AUAQ/TERRA-MODIS 气象站	2000 年至今 随不同观测站变化	1 日 4 次 随不同观测站变化	全球	星下点 1 km
近地表气温/K	NCEP/NCAR Reanalysis	1948 年至今	6 h	全球	1.9°× 1.9°
	NCEP-FNL	1979 年至今	6 h	全球	1°× 1°
热红外亮温/K	FY2-VISSR	2005 年至今	0.5 h	FY2C/2E; 60°N~60°S 45°E~165°E FY2D; 60°N~60°S 27°E~147°E	0.1°×0.1°
				全球	星下点 1.1 km
				全球	星下点 1 km
				全球	2.5°× 2.5°、1°× 1°
OLR/(W/m ²)	FY2-VISSR	2005 年至今	0.5 h	FY2C/2E; 50°N~50°S 55°E~155°E FY2D; 60°N~60°S 27°N~147°N	0.1°×0.1°
				全球	1.9°× 1.9°

测(包括常规观测和遥感非常规观测)和内在物理模型,使用不同时刻的离散观测值不断修正模型,提高参数精度,从而输出具有物理和时空一致性的连续数据集。而地面观测数据尽管是点观测模式,无法获取大面积信息,但因为是直接测量的第一手资料,可以用来检验卫星遥感反演产品与同化资料的精度。

由于地震热异常具有“强背景、弱信息”的特点,如何识别提取与地震有关的异常信息是一个难点问题。目前,用于地震热异常识别提取的方法主要包括:

(1) 目视解译法:指对热红外影像进行假彩色合成后,根据不同地物的热辐射特征差异对地震热异常进行识别与判断,早期研究多采用此方法(Qiang et al, 1991, 1992, 1993, 1999; 强祖基等, 2008, 2009; 徐秀登等, 1991a; 叶民权等, 1994; Ye et al, 1995; Tronin, 1996, 2000)。但该方法对综合知识要求高,多用于定性研究,存在主观臆断的可能。

(2) 背景场差值法:指通过计算地震前数据与背景场的差值来分析温度的相对变化情况。该方法考虑了温度的正常分布,可以获取异常增温幅度和异常增温面积,缺点是背景场选取的不确定性较大,不同的背景场会得到不同的结果。例如, Ouzounov 等(2004)分别用2002和2003年的数据做背景和2001年的数据计算陆地地表温度(land surface temperature, LST)差,分析了2001年1月26日的印度古吉拉特地震前的热异常情况;潘达等(Panda et al, 2007)用2000—2004年和2005年的均值计算LST差,分析了巴基斯坦2005年10月8日地震前的热异常情况;马未宇等(2006)提出将天体引潮力的拐点作为背景时间来计算差值。

(3) RST (RAT) 方法: Tramutoli 等(2001, 2005)针对NOAA卫星的高级甚高分辨率辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)热红外图像提出了一种多时相遥感RAT (robust AVHRR techniques)统计方法,分析了印度、希腊、土耳其、意大利等国家的地震热异常,并将此推广到其他的传感器数据,称之为RST (robust satellite data analysis technique)方法。李金平等(2008a)在RST方法基础上进一步提出了一种基于参考基准场的震前热红外遥感定量分析模型与异常识别方法。

(4) 断层带内外比较法:根据构造地震的理论,地震是活动断层剧烈错动的结果,而活动断层带则是地震相关热信息积累和运移的主要通道。因此可以通过对断裂带内外温差变化过程的分析来进行异常信息的识别与提取(陈顺云等, 2006b)。具体实现技术为:以选定的活动断裂为对象,以一定的距离求取缓冲区,通过空间分析逐日计算缓冲区内外的差值。

(5) 涡度分析法:指经纬网格数据中任一格点的数据与其相邻格点数据进行的差值处理的方法。刘德富等(1997, 2003)将此方法引入地震前长波辐射

异常分析中,通过大量震例研究,取得了较好的效果。

(6) 透热指数法:刘培洵等(2004)基于热传导与热辐射的时间差异,提出反映地下热异常的新指标“透热指数”来消除天气因素的干扰。即利用基岩、土壤或植被等不同地物由于热惯量、热扩散率差异导致的对地下热信号响应时间差别,从地表温度信号中提取地下的热异常。

(7) 小波分析法:指通过小波变换将热参数信息的时间域信号转化为频率域信号,根据影响热参数的不同因素在不同频带的能量差异检测出与地震相关的信号。陈顺云等(2006a)、Cervone等(2006)、塞里吉安等(Saradjian et al, 2011)分别利用小波法分析了地震前的热红外亮温、长波辐射、SLHF、气温异常。

(8) 异常点比值时序法:该方法首先计算每个像元若干天的亮温变化曲线的均值和标准差,以2倍标准差作为阈值判定异常点,然后再将异常像元总数除以分析区域内总像元数,得到异常点比值,以描述分析区域内某一天增温异常的活跃度(刘放等,2007)。正常情况下,亮温变化在时间和空间上是随机的。这种随机性在亮温异常点比值时序分析的数值上表现为在某一固定值上下波动。如果出现了持续的、较大面积的增温异常,则亮温异常点比值会明显增大,表明活跃度加强。

(9) 功率谱法:指利用波形数据处理中的功率谱法获得优势频率和幅值,通过分析地震前后温度变化的功率谱差异来识别异常。郭晓等(2010)应用该方法分析了2008年中国汶川8.0级地震、2011年日本宫城9.0级大地震和2011年缅甸东北部地区7.2级地震,得到了较好的结果。

(10) 夜间热梯度方法:卢卡(Luca)与加埃塔诺(Gaetano)使用欧洲静止卫星EUMETSAT-SEVIRI的高时间分辨率(15min) LST数据,通过线性回归计算夜间热梯度(night thermal gradient, NTG)来表征热异常信号,并且进一步采用移动均值化处理以降低云的影响,增加信噪比。应用该方法揭示的2009年意大利拉奎拉地震前热异常时空特征不仅与其他文献报道一致,而且与无震时期形成明显对比。

1.2.3 机理与实验

为了解释地震遥感异常产生的内在机理,国内外学者通过空气电场实验、岩石加载实验等手段开展了有益的探索研究,提出了气热说、应力致热、地下流体作用、空穴正电荷理论、氦气衰变释放潜热等假说(徐秀登等,1995,2001)。近年来,为了从整体的地球系统角度研究多个地震前兆异常的机理,Pulinets等(2006,2007,2011)提出了岩石层—大气层—电离层(lithosphere-atmosphere-ionosphere, LAI)耦合模型。由于不同的盖层(水体、植被、土壤等)必然会

对地震前兆异常信号产生明显的影响(放大或缩小),因此,吴立新等(Wu et al, 2012)特别指出了盖层的重要性,并建议在不考虑电离层的情况下,以岩石层—盖层—大气层(LCA)耦合为统一框架去综合分析多个热异常参数。

(1) 气热说:最早报道地震卫星红外异常的苏联学者戈尔内等人(Gorny et al, 1988)认为热异常可能与断层近地表处大气层的气体混合物成分的改变有关。由于震前构造活动加剧,区域内岩石和地表的微破裂张开,使得地下高浓度气体,如 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 Rn 等气体溢出地面,在电场作用下,温室气体将出现异常的增温效应。强祖基等(1995; 1997)通过 CO_2 、 CH_4 等混合气体的电场实验证明:在太阳辐照和瞬变电场作用下可引起 $3^{\circ}C \sim 6^{\circ}C$ 的增温。徐秀登等(1995)进行了几十次不同电场强度下不同气体的增温效应的对比模拟试验,认为地震短临热红外辐射增强的原因是在太阳辐射下大气电场诱导气体激化产生红外辐射。王志敏等通过实验基本证明了热红外温度异常与太阳照射、大气电场、大气成分密切相关。非极性气体如 CO_2 、 CH_4 的含量越高,增温越大。而极性气体,如水蒸气则相反,含量越高,增温越小。 CO_2 、 CH_4 含量高的大气,其增温远远超过单纯由温室效应引起的增温,其幅度可达 $10^{\circ}C$,而水蒸气引起的增温还没有单纯由其温室效应引起的高。利韦罗夫斯基(Liperovsky)等(2005, 2011)认为,地震前由于地壳发射物(氦、惰性气体和金属气溶胶等)的化学反应改变了大气边界层的电导率,进而产生了附加大气电场,激发了红外电磁波辐射。

(2) 应力致热:邓明德等(1997)认为地震前出现的热异常是由于地壳应力作用使得机械能转化为热能,并通过岩石中的孔隙和震前的微小破裂传输到地面。他们通过岩石力学实验模拟研究了走滑型和破裂型两种不同地震类型的温度异常前兆特征。吴立新和王金庄开展了多种加载方式下的岩石红外辐射观测实验。2000年,吴立新、崔承禹、耿乃光等共同撰文,在国际学术期刊《International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences》上正式阐明了遥感岩石力学(remote sensing rock mechanics, RSRM)这一交叉学科的定义、内涵和基本框架。然后,吴立新又在国内学术期刊《岩石力学与工程学报》上总结梳理了RSRM多年的研究成果,指出了未来发展的两个主要方向。此后几年,吴立新、刘善军等利用双轴加载实验系统、红外热像仪和声发射仪,以非连续组合断层、断层双剪黏滑、交汇断层黏滑、岩石压减破裂等4种构造地震孕震机制为模拟对象开展了大量的实验研究。同时,马瑾院士领导的团队也开展大量的岩石加载红外辐射实验工作。

(3) 地下流体作用:即震前地下流体上升导致热气的溢出造成热异常。Tronin(1996, 2000)认为地震前在构造应力作用下地下流体以断裂和岩石中的裂缝作为通道向上传输,在地下几千米深处分解为水和气体(CH_4 、 CO_2 、 Rn

等),一方面引起了温泉和表层水的离子含量、水温等的变化,另一方面通过热对流、热辐射等方式改变了地表温度及近地表气温。

(4) 空穴正电荷理论:位于地壳深部的岩石通常被认为是绝缘体,但是 Freund (2000, 2002) 通过岩石加载实验发现,在压力作用下,岩石中会释放出被称作空穴正电荷 (positive hole, P-hole) 的粒子。这些粒子在岩石表面重新结合释放能量产生红外辐射。他们将这一发现称为空穴正电荷理论,认为可以用来解释众多的地震前兆现象,如低频电磁辐射、电离层等离子体密度变化、井水水位变化等。

(5) 氦气衰变释放潜热: Pulinets 等 (2006, 2007, 2011) 认为现有的地震热异常机理无法解释潜热和空气湿度的变化,而目前正在发展的 LAI 耦合理论可以对这一现象做出合理解释。根据 LAI 耦合理论,强震前来自活动断层的氦析出增强,衰变后产生高能 α 粒子,引起了近地表大气层电离化,从而导致近地表大气层一系列的物理化学变化。电离产生的离子成为水蒸气凝结中心,大量水分子附着在新生成的离子上。从水分子的能量状态来看,离子附着过程等于水凝结过程。显然,水凝结时,由于水汽分子变为液态水,分子间的位能减小,因而释放潜热,表现为 SLHF 为正值 (代表地表指向大气层)。在大气的热平衡中 (总量是 185 W/m^2), 其中水蒸气潜热占了 88 W/m^2 , 这意味着潜热变化能有效地改变空气温度。潜热变化的幅度主要取决于空气电离化的效率以及附着于新生成的离子的水分子的个数,通过理论计算和实验测量表明,超过 100 多个水分子附着在一个单个离子上。进入临震阶段,氦浓度减少,温度和 SLHF 重新回归正常。需要指出的是,空气电离化本身并不是热异常能量的来源,震前热异常主要是地壳内部热量的释放,存储在水分子和离子中的能量仅仅是帮助释放这些热能。

此外还有地下热传导 (兰州地震大队气象地震组, 1976)、断层蠕动摩擦生热 (蔡永恩, 1987)、微震声波振动促使土壤热通量变化 (郭子祺, 1998) 等假说。

1.2.4 问题与不足

目前,虽然地震热异常研究取得了长足的进步,已经成为国内外学术界广泛关注的热点之一,但是,仍然存在一些关键的问题与不足,限制了该研究的深入开展。

(1) 单参数分析较多,缺乏多参数关联性分析。

早期的地震遥感热异常研究多是针对单个物理参数的异常识别与分析。事实上,各种异常信号之间并非是独立存在的,而是存在着因果、伴生等复杂的相互关系。近年来,随着多源多参数的使用,已经开展了一些多参数的关联性分析,例如, Singh 等 (2007, 2010) 分析了 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊地