



卫星红外遥感在地震预报中的应用及研究进展

张元生^{1,2} 柳钦火² 郭晓¹

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要:介绍了卫星红外遥感在地震预报中的应用及研究现状,认为目前该技术的应用离实际的预报要求还存在一定的差距,提出了未来的研究重点,分析了卫星红外遥感技术在地震预报中的作用及应用前景。

关键词:卫星红外遥感;地震预报;增温异常;进展

中图分类号: P315.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)04-0357-05

0 引言

地震预测预报,特别是短期-临震预测预报,是世界性科学难题。1997年,美国地震学家 Geller 等人分析世界多次震例的所谓震兆后认为,这些震兆“是不能得出地震未来的三要素(时、空、强)的”,进而提出“地震是不能预报的”的观点,从而在国际学术界引发了一场“地震能否预报”的大争论。梅世蓉在地震预测研究中认为,目前对于地震监测预报而言,我国地震台网,尤其是地震前兆网,存在着严重的三个主要缺陷:第一,中国大陆约90%的中强地震或强震发生在西部,而西部台网布局极为稀少。第二,全国地震前兆台网都是以“点测”形式进行相对变化量的日常观测,各台站的观测数据都是相对独立的,台站之间数据没有相互关系。第三,地震活动是区域性和全球性的,而前兆观测是独立的,不相关的,则难以研究其与全球地震活动的关系。2002年,中国地震局科学技术委员会办公室总结归纳当前地震预报面临的主要科学问题后认为:要解决地震预报问题,必须“要有新的思维、新的观测手段和新的研究思路,并对地震前兆深入认识,这是突破地震预报的关键。前兆信息的获取应从点信息(观测点)发展到面信息(卫星观测的GPS、OLR)和体信息(动态监测地下的应力应变和相关几何、物理场的变化)。

自20世纪80年代末,随着卫星遥感技术的迅速发展,在地震预测预报中提出了新的预测方法和手段,即卫星红外遥感技术在地震预测中的应用。国内外不少地震学家作了大量的地震红外异常机理^[1-3]、岩石实验^[4]、红外遥感技术的应用方法及典型震例^[5-7]对比分析研究,取得了许多有意义的研究成果。1993年,傅承义院士指出:“地震时,地震前的这种变换就可以产生各种固体地球与大气耦合的界面现象;物理的、化学的、生物的都可以发生,其实若将震源的形成不是局限于局部地区的岩体错,而是广大的地下,则大面积活动的岩石层可作为地震的信息源”。他进一步解释:“它们有些气象前兆就是如此”,即卫星热红外增温异常。典型震例卫星热红外波段的温度资料分析结果表明,震前确有增温现象。据初步研究表明,这类由地壳运动引起的增温特征与气象或其他因素引起的增温是可以区别的。

1 热红外异常与强地震孕育过程的关系研究

红外线是英国物理学家赫谢尔在1800年发现的。红外线最显著的作用是热作用,波长(0.76~700

收稿日期 2004-05-14

基金项目 国家“十五”科技攻关课题(2004BA601B01-02-02)和“西部之光”中国地震局兰州地震研究所论著编号 LC2004024。

作者简介 张元生(1965-),男(汉族),贵州湄潭人,研究员,主要从事地震波理论与应用、卫星红外遥感应用以及地震预报理论与方法研究。

μm)比红光还长,衍射现象比较显著,易于穿过大气层。任何物体在温度大于 0°K (高于 -273°C)的情况下,都存在热辐射。由于地表温度一般在 $250\sim 300^\circ\text{K}$ 范围内变化,地球表面是一种长波辐射,肉眼是看不见的,只有特殊仪器才能感知到。利用对红外线敏感的物质材料制造专门的仪器,并安装到人造卫星上,可对地球表面进行定时的、大面积的观测,从而获得地表的长波辐射场。热辐射量值的大小取决于辐射物的表面温度和辐射物的辐射本领(比辐射率)的大小。因此,通过观测值的数据处理能够得到地表温度值。这是红外遥感的基本原理。

产生热红外异常的直接原因是什么?由热辐射机理,热异常的直接原因是物体的辐射温度发生了变化。使地表温度变化的因素有多种,主要有:季节变化引起的温度变化、冷热空气引起的温度变化、昼夜引起的温度变化、雨雪引起的温度变化以及地壳内部结构的变化引起的地表温度变化。地震预测主要关心后一种变化,因此问题的关键在于研究地壳内部结构的变化引起的地表温度变化与其它因素引起的变化的区别。这个问题是我们目前有待解决的重要问题,它有关卫星红外遥感技术在地震预测中的可应用性问题。

目前关于热红外异常与强地震孕育过程的关系研究已取得了一定的进展。强祖基等提出了“气热说”^[8],在地震发生前,大范围岩层受力,地应力的不断增强导致岩层出现裂缝,使岩石释放出二氧化碳、甲烷、氢气和氮气等气体。地表电磁场的异常变化会轰击这些气体,使它们释放出热量,产生热红外异常,而导致震区低空大气增温。在“卫星遥感热红外异常与地震短临预报”研究中发现,地震前在震中区的周围会出现低空大气亮温(没有排除大气干扰的温度)的异常震兆。认为,地震前由于岩石圈板块的相互作用,应力不断积累并发生微裂隙,原储存在岩石圈内的气体,特别是温室气体,沿着裂缝溢出地表,受到太阳辐射和自身辐射,导致该地区温度增高,或者带电的微粒子随着地下水的运动,从岩石圈深处渗出地表,这些带电微粒子在低空处造成瞬变电场异常, CO_2 等可获能量,产生能级跃迁,释放出热量,使温度比正常场增高。

郭增建指出^[9],大震震源区锁住断层会产生预位移。由于这时断层受到的挤压应力有很高的值,因此预位移会使断层上产生很高的热量,使沿断层带温度升高。通常预位移的发生预示着大地震的发生已进入短临阶段。因此,监测断层带上温度的变化以及这种变化沿断层带两侧的空间变化进程,可以为大震的短临预报提供可靠的直接的指标。

王庆良在“地温前兆机理”研究中认为,除了传统的热导、热对流和热辐射这3种机理之外,应力做功在岩土介质中产生的耗散热能同样也可以引起岩土介质的温度上升。并提出一种较具有普遍意义的应力——耗散热地震地温前兆机理模式。

耿乃光等^[10]在热红外震兆成因的模拟实验研究中,对完整岩石破裂前和既存断层粘滑失稳前的红外辐射温度场进行遥感观测时,发现岩石破裂前在未来断层处出现条带状的红外热像。粘滑失稳前断层闭锁点出现升温现象。声发射测量表明,岩石破裂前已有大量微破裂产生。并认为地壳中的既存断层和大震前的微小破裂均可能为震前地壳中的热能转移提供通道,从而导致地面热红外震兆的出现。

吴立新等^[11]在岩石实验中发现,岩石在压剪破裂瞬间剪切面的红外辐射温度超过 73°C ,花岗岩在刻划瞬间的红外辐射温度超过 317°C 。这与郭增建的观点相吻合。对多个震例的震前卫星红外异常的形成机理综合分析表明,异常的产生应是多种成因、多种机制综合作用的结果,其中孕震应力致热效应是一次效应,气体温室效应及突变电场激发致热效应是二次效应,它们都是卫星红外增温异常形成的主要因素。而这些热效应的源泉则是孕震应力源的应力机械能。同时提出了两种力学活动形式的红外遥感地震预测指标模式(地震三要素预测指标),具有较大的实际参考价值。

总之,地震学家们经过10多年的深入研究,提出了较为合理的地震热红外前兆异常的机理解释,对岩石加载过程中产生的红外辐射已获得了一些定性的认识,积累了大量的实验性经验,为今后开展卫星热红外遥感技术在地震预测预报中的应用研究奠定了理论基础。

2 卫星热红遥感资料在地震预报中的应用研究

自20世纪80年代末,随着卫星遥感技术的迅速发展,卫星热红外遥感开始成为地震预测预报中新的预测方法和手段。1988年,前苏联学者 Gorny、Tronin 等分析中亚地区的地震卫星热红外遥感图像时意外发现,该地区的一些中强地震($M_s \geq 5.5$)震前,卫星红外图像上存在热异常现象,且与断裂构造的活动有关。在活动断层表面存在着稳定和不稳定的热红外辐射异常,异常增温可达到几度的量级,异常的形态为线性条带。我国科学家很快意识到这一发现的重要性,迅速开始了这方面的探索研究,并将这一方法正式应用于地震预报实践。1996年,Tronin 等进一步对中亚地区近10年约10000景NOAA卫星热红外通道的热像进行系统分析,证实中亚地震活动区震前的卫星热红外异常(平均 $1 \sim 5^\circ\text{C}$)与该区地震活动存在显著的统计关系。

强祖基等^[12]利用卫星遥感热红外图像等资料经过多年的研究取得了明显的预报效果。结果表明:(1)地震前在远离震中区出现一大片孤立增温区,比其周围高出 $2 \sim 6^\circ\text{C}$ (2)震级愈大,亮温增温面积也愈大(3)利用增温异常演化来追寻的未来地震的震中位置,往往是在随着时间迁移的增温异常的前缘或其前锋与地震带、活动构造带交汇部位,或是孤立亮温增温异常凹陷部位,或是两组应力热带交汇部位;(4)一般在亮温增温异常发展到鼎盛时期后,在几天至60天内发震即进入短期和临震时期。

徐秀登等^[13]分析了1989-1999年发生在中国及相邻地区的40多次地震的卫星热红外图像,初步得出红外异常有如下基本特征(1)5级以上地震震前多有清晰可辨的红外临震异常显示(2)红外异常多在震前2~22天内突然出现,呈现突发性特征(3)与地震有关的热红外异常可持续几天到十几天,甚至更长,而非地震异常则会很快消失(4)震前二到十几天累计增温幅度可达几度到十几度,异常区的温度比背景温度高出几度,异常幅度与震级的相关性不甚明显,但一般呈正相关(5)异常面积的大小与震级呈一定程度的正相关(6)在40次地震中有30次地震的震中位于弱异常区或异常区边缘甚至远离异常区几十公里(7)增温异常一般经历初始—高值—平静3个阶段,异常演变呈阶段性。也有些异常演变具多旋回性,即增温经高峰到平静期后并不发震,又出现第2轮甚至第3轮再增温过程,最后才发震。

马谨等^[14]在研究1997年玛尼7.9级地震前后震中周围地区地温场图像的动态演化时发现,在震前20天阿尔金断裂的东段就开始出现增温现象,然后逐渐扩展,形成了明显的条带。这条带一直持续到11月8日玛尼强震的发生。震后此条带逐渐消逝。而引发玛尼地震的玛尔盖茶卡断层在震前2天才开始出现增温异常。图像的变化过程显示,玛尼地震与阿尔金断裂带活动的明显增强过程之间有一定的对应关系,说明两断层间存在相互作用,以及变形异常—断层现今活动—地震三者间有密切关系。

刘德富^[15-16]利用卫星红外通道的长波辐射(OLR)资料研究异常与地震的对应关系,取得了较好的结果。1976年龙陵7.4级地震、唐山7.8级地震、松潘7.2级地震、1985年乌恰7.4级地震以及1990年青海共和7.0级地震在发震前1个月,月平均OLR值增长显著,到达历年同期最高值。康春丽等^[17]以卫星热红外遥感产品的两种参数—长波辐射强度(OLR)(月际资料)和亮度温度(日际资料)为基础,对2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震前后的卫星热红外变化特征进行了分析,结果显示(1)在空间分布上,昆仑山口西地震前长波辐射强度和亮度温度都出现了增强趋势,表现为沿近东西展布的异常条带,地震结束后,长波辐射强度出现了与上述条带展布范围和方向完全不同的新的增强条带。(2)在时间上,长波辐射强度的异常变化在震前2个月出现,而亮度温度的异常变化出现时较短,在震前的6~7天内出现,并呈现逐渐增强趋势。(3)热红外的异常增温条带与震中区的构造断裂带方向基本一致。(4)这种增温条带在地震活动结束后基本消失。其他如吕琪琦等(2000)对1998年张北6.2级地震研究中,用异常图像与正常图像的差值揭示异常分布与断裂构造相关。邓志辉等在“十五”课题“红外遥感地震短期前兆的异常特征、预测方法和机理研究”研究中,对几次典型震例的卫星热红外资料分析结果表明,热红外异常随时间的分布形态一般表现为增温条带出现,临震前5~20天内有逐渐增强的趋势以及临震前震中附近出现局部明显增温现象,且随着地震的临近存在迁移现象。热红外异常震前持续时间一般为15~25天(幅

射亮温卫星图像)和5~10天(地表温度场图像)地震异常出现之后的10~20天内发生地震的可能性很大。

从卫星热红外遥感资料的实际应用来看,强震发生前在震中区附近确存在不同程度的温度异常,这为开展卫星热红外遥感技术在地震预报中的应用较好地奠定了实践基础。已有卫星遥感震例资料处理分析结果表明,时间指标和地点指标是比较明确的。一般在温度异常出现一个月内发震的可能性较大,时间指标具有实际的可操作性。温度异常出现的分布形态一般有两种,一种是条带状分布,一种是大面的不规则分布。根据现有的热红外异常机理研究结果,这两种异常分布形态很有可能与构造应力集中区域及相关活动断层性质存在密切的关系。因此地点的判定要比时间的判定复杂得多,要做好地点判定首先要对异常出现的区域构造环境及应力环境有比较清楚的认识,再结合异常的空间演化特征进行综合分析判定。地震的强度判定有困难,虽然已提出了一些进行地震强度的判定依据,但这些依据都是经验性的,操作起来较困难。强地震震前在地表引起的异常幅度及异常面积大小除了与地震的强度有关外,应与地震的深度和地震发生的构造性质都存在密切的关系。这是强度判定困难的重要原因。

从前人的研究中我们可以清楚地看到,所用的分析资料多数是亮温和辐射亮度,但亮温和辐射亮度分别只有温度和辐射强度的量纲,而没有温度和辐射强度的物理意义。到目前为止,卫星热红外遥感资料在地震预测应用研究中还存在一些问题,主要表现在热红外遥感应应用技术与资料处理方法方面。资料处理方法是热红外遥感资料应用于地震预测的关键,因为辐射亮度是红外扫描仪器的观测值(输出值),它包含有地表、大气和仪器响应函数等信息,每一个通道所测得的地表和大气辐射强度,以及相应的仪器响应函数都是不一样的,因此通道与通道之间的观测值不是简单加法计算。地震热红外异常很可能是通过地表和底层大气表现出来,热红外异常的直接原因是目标物的辐射温度发生变化而引起的,如何提取目标物的辐射温度是解决关键问题的重要环节。另外,在这些震例研究中对地震红外前兆异常与其它因素引起的地表温度异常的差异研究不深入,只是描述性的,因此这也是我们今后研究的重点。

3 未来的研究重点及展望

众所周知,地震预测是指地震的三要素预测,即时间、地点和强度预测。由于地震活动的复杂性和地震预测水平不高,目前多采用综合预测方法进行地震预测。但是综合预测方法是建立在单一手段和相应预测方法基础之上的,每一种预测方法除了与所使用的资料的可靠性、连续性以及资料所反映的范围有关外,还与方法本身的科学性有密切关系。因此只有做到每一种方法手段都具有真实可靠之后,综合预测方法才能发挥其更大的作用。卫星红外遥感技术应用于地震预报的预测方法也不例外。为了把卫星红外遥感应应用于地震预报,发挥其应有的作用,我们提出了未来研究的重点内容供同行借鉴:(1)研究提取地表温度(目标物的辐射温度)的可行性技术方法,这是热红外遥感资料应用于地震预测必须研究的关键性问题;(2)充分利用大气观测数据(大气廓线数据),研究大气辐射对卫星观测数据的贡献以及怎样扣除大气辐射的影响;(3)研究地震热红外异常与其它因素引起的异常之间差异及区别,为正确识别地震异常提供可靠依据;(4)进一步开展地震热红外异常机理研究;(5)卫星遥感资料是海量数据,应研制一套把卫星遥感资料应用于地震预测的适用性软件;(6)建立温度场、辐射场以及背景场(标准场)数据库,并保证数据的完整性和数据的共享性。

卫星遥感资料具有覆盖域广,资料具有连续性和重复性等优点,热红外遥感可获得大面积的与震情监视有关的测项数据,可构成地面温场动态变化的图像。大量研究表明,在地震孕育过程中,地表不仅有水平的、垂直的和倾斜的变形场出现,而且也伴随有辐射“热场”异变的显示。在中国大陆西北部地区无云天多,地震频度高、强度大,而人烟稀少,交通不便,地震监测能力差,因此在西部开展卫星遥感热红外资料在地震预报中的应用研究具有十分重要实际意义和广阔的应用前景。

- [1] 崔承禹, 支毅乔, 张晋开. 红外遥感用于地震预报的基础实验预研究[A]. 见: 第八届全国遥感技术学术交流论文集[C], 1993. 103 - 105.
- [2] 强祖基, 孔令昌, 郭满红, 等. 卫星热红外增温机制的实验研究[J]. 地震学报, 1997, 19(2): 197 - 201.
- [3] Gabriellov A, Zaliapin I, Newman W I, et al. . Colliding cascades model for earthquake prediction[J]. Geophysical Journal International, 2000, 143(2): 427 - 437.
- [4] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J]. 地震学报, 1992, 14(增刊): 645 - 652.
- [5] 徐秀登, 强祖基, 质常恭. 1976 年唐山地震前地面增温异常[J]. 科学通报, 1992, 37(18): 1684 - 1687.
- [6] 徐秀登, 张行才, 等. 张北地震与大气增温异常[J]. 西北地震学报, 2000, 22(1): 44 - 47.
- [7] 刘德富. 台湾集集强震前的卫星遥感长波辐射场变异分析[J]. 地球信息科学, 2000, 2(1): 33 - 36.
- [8] 强祖基, 孔令昌, 王弋平, 等. 地球放气热红外异常与地震活动[J]. 科学通报, 1992, 37(24): 2259 - 2262.
- [9] 郭增建, 秦保燕. 震源物理[M]. 北京: 地震出版社, 1979. 68 - 177.
- [10] 耿乃光, 于萍, 邓明德, 等. 热红外震兆成因的模拟实验研究[J]. 地震, 1998, 18(1): 83 - 88.
- [11] 吴立新, 柳钦火, 等. 岩石剪切红外成像及首都圈地震短临遥感预报的基础研究报告.
- [12] 强祖基, 质常恭, 等. 卫星热红外图象亮温异常—短临震兆[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(6): 564 - 573.
- [13] 徐秀登, 徐向民. 地震前红外异常的基本特征与成因机制[J]. 西北地震学报, 2001, 23(3): 310 - 312.
- [14] 马瑾, 单新建. 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[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 210 - 218.
- [15] 刘德富, 彭克银, 刘维贺, 等. 地震有“热征兆”[J]. 地震学报, 1999, 12(6): 710 - 715.
- [16] 刘德富, 罗灼礼, 彭克银. 强烈地震前的 OLR 异常现象[J]. 地震, 1997, 17(2): 126 - 132.
- [17] 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 等. 昆仑山 8.1 级地震的热红外前兆特征分析[J]. 西北地震学报, 2003, 25(1): 12 - 15.

PROGRESS IN APPLICATION AND STUDY OF THE TECHNOLOGY OF SATELLITE INFRARED REMOTE SENSING ON EARTHQUAKE PREDICTION

ZHANG Yuan-sheng^{1, 2}, LIU Qin-huo², GUO Xiao¹

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA Gansu Lanzhou 730000, China ;

2. Institute of Remote Sensing Application, Beijing 100101, China)

Abstract :The situation of application and study of the satellite infrared remote sensing on earthquake prediction is introduced. It is considered that there is a long way from the present application level of this technology to the need of earthquake prediction. So some important research points for future study are suggested, and the role and prospects of the satellite infrared remote sensing technology in earthquake prediction field are analysed.

Key words Satellite infrared remote sensing ; Earthquake prediction ; Temperature anomaly ; Progress