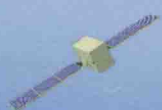


中国地震卫星热红外异常的 亮温背景场研究

马晓静 张国丰 著



地质出版社

中国地震卫星热红外异常的 亮温背景场研究

马晓静 张国丰 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

卫星红外亮温背景场的研究是震前热红外异常信息提取的基础。本书系统研究了中国卫星红外亮温背景场的基本特征及影响因素,主要内容包括中国卫星红外亮温背景场的时空分布规律、中国卫星红外亮温与地面高程的关系及中国卫星红外亮温与大地热流的关系,为震前热红外异常信息的提取提供一定的帮助。

本书可供遥感地质学相关专业科研人员及高校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

中国地震卫星热红外异常的亮温背景场研究 / 马晓静, 张国丰著. —北京: 地质出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-116-10069-5

I. ①中… II. ①马… ②张… III. ①地震监测-卫星遥感-红外遥感-研究 IV. ①P315.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 265813 号

责任编辑: 柳 青

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)66554528(邮购部); (010)66554632(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)66554686

印 刷: 北京地大彩印有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 6

字 数: 150 千字

版 次: 2016 年 11 月北京第 1 版

印 次: 2017 年 3 月北京第 1 次印刷

审 图 号: GS(2017)418 号

定 价: 38.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-10069-5

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

自 1988 年苏联的 В. И. ГОРНЫЙ 等人首先发现了地震前卫星热红外异常以后, 国内外许多学者分别在这一领域进行了大量的研究探索。目前很多学者都是利用增温来提取震前红外异常, 但是卫星红外亮温是地表诸因素热辐射的综合反映, 它受到季节、高程、纬度和植被等诸多非构造因素的影响, 在正常 (无震) 情况下亮温也是不均匀分布的, 仅凭遥感图像上亮温的高低无法确定是否存在异常, 更难分清构造异常与非构造异常。异常的判定必须建立在了解正常背景的基础上。因此, 研究正常情况下亮温的变化规律, 即亮温背景场动态, 是必要和迫切的。

目前对卫星红外亮温背景场的研究多是围绕个别震例, 为了提取地震前红外异常的需要而进行的。不同的作者针对不同的地震, 为了达到提取和突出热异常的目的, 可能使用非常不同的红外亮温背景场, 对其物理含义、时空变化规律和影响因素不甚了解, 导致异常分析结果非常混乱, 难于给出正确的评价。产生上述混乱的原因之一是目前对卫星红外亮温背景场进行系统研究还很少。人们对地震红外异常研究已有十多年了, 已经积累了一定的震例和资料, 也发现了大量的问题, 现在应该是深入研究背景场的时候了。

针对以上问题, 本书对中国卫星红外亮温背景场及其影响因素进行了比较系统的研究。本书的框架是: 第一部分为绪论, 主要介绍了遥感、热红外遥感的概念及特点, 热红外遥感在地震异常信息提取方面的应用及存在的问题; 第二部分卫星遥感热辐射的原理; 第三部分介绍了中国卫星红外亮温背景场的分布规律。在以上分析的基础上, 第四部分分析了中国卫星红外亮温与地面高程的关系; 第五部分研究了中国卫星红外亮温与大地热流的关系; 最后, 第六部分对上述研究进行总结并提出存在的问题。文后附录, 列出了在计算中用到的部分数据。

本书暂缺海南岛、台湾岛、南海诸岛等海岛的数据, 特此说明。

本书是在河北地质大学“博士科研启动基金 (BQ201507)”和“国家级专业综合改革试点——资源勘查工程专业 (290128)”的资助下出版的。在此表示衷心的感谢。

作 者

2016 年 9 月

目 录

前 言

1 绪论	(1)
1.1 遥感及其特点	(1)
1.1.1 遥感的概念	(1)
1.1.2 遥感过程	(1)
1.1.3 遥感数据特征	(2)
1.1.4 遥感的优势	(3)
1.2 热红外遥感	(4)
1.3 应用卫星遥感技术研究地震前的热异常	(4)
1.4 卫星红外亮温背景场的研究	(7)
1.5 存在的问题	(7)
1.6 研究内容	(8)
2 卫星遥感热辐射的原理	(9)
2.1 热辐射原理	(9)
2.1.1 黑体的辐射	(9)
2.1.2 真实物体的辐射	(10)
2.1.3 热辐射传输	(11)
2.1.4 亮度温度	(12)
2.2 卫星热红外遥感	(12)
2.2.1 大气效应与大气窗口	(12)
2.2.2 热红外遥感的波段选择	(12)
2.2.3 卫星热红外图像的特点与解译	(14)
3 中国卫星红外亮温背景场	(18)
3.1 研究资料	(18)
3.1.1 气象卫星简介	(18)
3.1.2 GMS-5	(19)
3.2 研究方法及其结果	(19)
3.3 结论及讨论	(34)
4 中国卫星红外亮温与地面高程的关系	(36)
4.1 研究资料及方法	(36)
4.2 研究结果	(37)
4.2.1 亮温分布	(37)

4.2.2 亮温梯度 (40)

4.3 结论与讨论 (43)

5 中国卫星红外亮温与大地热流的关系 (46)

5.1 数据资料 (46)

5.2 研究方法及其结果 (47)

5.2.1 亮温的分布特征 (47)

5.2.2 亮温与大地热流的关系 (49)

5.2.3 月亮温差值与大地热流的关系 (51)

5.3 结论与讨论 (56)

6 主要结论及存在的问题 (58)

6.1 主要结论 (58)

6.1.1 中国卫星红外亮温背景场的分布特征 (58)

6.1.2 中国卫星红外亮温与地面高程的关系 (58)

6.1.3 中国卫星红外亮温与大地热流的关系 (59)

6.2 存在的问题 (60)

参考文献 (61)

附 录 (63)

致 谢 (87)

1 绪 论

1.1 遥感及其特点

1.1.1 遥感的概念

遥感 (Remote Sensing) 即遥远的感知。从字面理解, 就是远距离不接触“物体”而获得其信息。它通过遥感器“遥远”地采集目标对象的数据, 并通过对数据的分析来获取有关地物目标或地区、现象的信息的一门科学和技术。遥感采集的数据可以有多种形式, 包括电磁波 (光、热、无线电等)、力 (重力、磁力等) 和声波等。

本书的内容涉及的是电磁波遥感的范畴。即利用航天、航空 (包括近地面) 遥感平台上的遥感仪器, 获取地球表层特征的反射或发射电磁辐射能的数据, 通过数据处理和分析, 定性、定量地研究地球表层的物理过程、化学过程、生物过程和地学过程, 为资源调查、环境监测等服务。这里把地球作为遥感的研究对象。因此可以说, 遥感是以电磁波与地球表面物质相互作用为基础, 探测、分析和研究地球资源与环境, 揭示地球表面各要素的空间分布特征与时空变化规律的一门科学技术 (赵英时等, 2003)。

1.1.2 遥感过程

图 1.1 为遥感过程示意图。它反映了遥感数据获取 - 数据处理、分析 - 数据应用的全过程, 简述如下:

1) 能源。所有的被动遥感所利用的能源都是太阳辐射能。太阳能的波谱范围包括紫外、可见光、红外等, 被动遥感正是依赖于地表特征反射太阳辐射能或自身发射的能量。

2) 大气传播。太阳辐射能通过大气层, 部分被大气中的微粒散射和吸收, 使能量衰减。

3) 到达地表的能量与地表物质相互作用。地表特征是十分复杂的, 不同波长的能量到达地表后, 被选择性地反射、吸收、投射、折射等。

4) 再次的大气传播。地表反射或发射的能量, 再次通过大气, 再次能量衰减。此时的能量已不同于进入大气层时的较为均一的能量, 而是包含着不同地表特征波谱响应的能量。它再次经大气吸收、散射等作用而衰减。此次的大气效应, 对遥感影响较大。

5) 遥感系统指不同的遥感平台和遥感器的组合。如照相机、多光谱扫描仪等。不同的遥感系统均有自身的优势和局限性, 并在数据获取过程中伴随不同的几何和辐射畸变, 在运用各种遥感数据时, 需要了解它们的特点及误差并设法进行校正。

6) 图像数据产品。遥感仪器所记录的地表反射、发射电磁波谱特征。主要有两种形

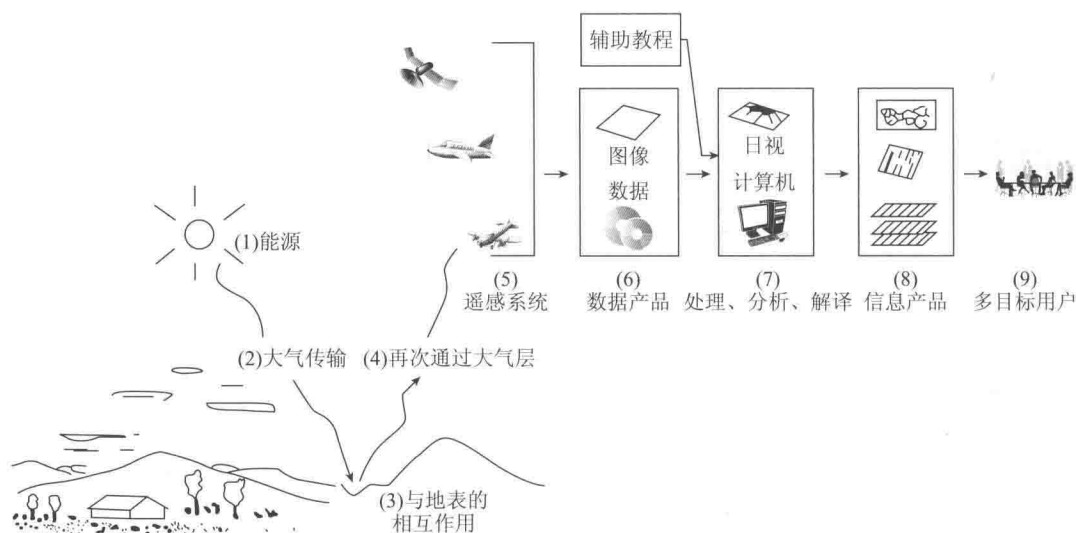


图 1.1 遥感过程示意图

式：一是模拟图像，如摄影图像；二是数字图像数据，如用扫描仪得到的亮度值矩阵。

7) 数据处理、分析与解译。遥感派生出的数据可以通过模拟和数字图像处理技术，变为可解译的形式，并转换为有用的信息。

8) 信息产品。包括各种图形、图像、影像图、专题图、表格、各种地学参数、数据库文件等。

9) 多目标用户。如资源调查、环境监测、地震预测、区域规划等。

1.1.3 遥感数据特征

遥感技术的发展、遥感采集的多样性、观测条件的可控性，确保了所获得的遥感数据的多源性，即多平台、多波段、多视场、多时相、多角度、多极化等。从这个意义上可以认为遥感数据是“多维的”，这种多维性可以通过不同的分辨率和特性来度量和描述。

(1) 空间分辨率

遥感器可以放置在太空站、轨道卫星、航天飞机、航空飞机、高塔、遥感车等不同的遥感平台上。这些不同平台的高度、运行速度、观察范围、图像分辨率、应用目的等均不相同，它们构成了一个对地球表面观测的立体观测系统。

选择平台的主要依据是地面分辨率，又称空间分辨率。前者是针对地面而言，指可以识别的最小地面距离或最小目标物的大小。后者是针对遥感器或图像而言，指图像上能够详细区分的最小单元的尺寸或大小，或指遥感器区分两个目标的最小角度或线性距离的度量。它们均反映对两个非常靠近的目标物的识别、区分能力。一般可有 3 种表示法：

1) 像元。空间分辨率即单个像元所对应的地面的尺寸，单位为“m”或“km”。如美国 QuickBird 商业卫星一个像元相当于地面面积 $0.61\text{m} \times 0.61\text{m}$ ，其空间分辨率为 0.61m 。像元是扫描影响的基本单元，是成像过程中或用计算机处理时的基本采样点，由亮度值表示。

2) 线对数。对于摄影系统而言,影像最小单元常通过 1mm 间隔内包含的线对数确定,单位为“线对/mm”,所谓线对是指一对同等大小的明暗条纹或规则间隔的明暗条对。

3) 瞬时视场。指传感器内单个探测元件的受光角度或观测视野,单位为“mrad (毫弧度)”。瞬时视场越小,最小可分辨单元越小,空间分辨率越高。

(2) 光谱分辨率

电磁波谱是按电磁波在真空中的波长和频率来划分的。遥感所利用的电磁波谱范围主要是紫外 ($0.3 \sim 0.38\mu\text{m}$) - 可见光 ($0.38 \sim 0.74\mu\text{m}$) - 近红外 ($0.74 \sim 1.3\mu\text{m}$) - 短波红外 ($1.3 \sim 3\mu\text{m}$) - 中红外 ($3 \sim 6\mu\text{m}$) - 远红外 ($6 \sim 15\mu\text{m}$) - 微波 ($1\text{mm} \sim 1\text{m}$)。

不同波长的电磁波与物质的相互作用有很大的差异,也就是说物体在不同波段的光谱特征有很大的差异。因此,人们研制各种不同的探测器,设计多种不同的波谱通道来采集信息。

遥感信息的多波段特性,多用光谱分辨率来描述。光谱分辨率是指传感器所选用的波段数量的多少、各波段的波长位置及波长间隔的大小。即选择的通道数、每个通道的中心波长、带宽,这 3 个因素共同决定光谱分辨率。

(3) 时间分辨率

时间分辨率是关于遥感影像间隔时间的一项性能指标。遥感探测器按一定的时间周期重复采集数据,这种重复周期又称回归周期,它是由飞行器的轨道高度、轨道倾角、运行周期、轨道间隔、偏移系数等参数所决定,这种重复观测的最小时间间隔称为时间分辨率。

根据遥感系统探测周期的长短可将时间分辨率划分为 3 种类型:

1) 超短或短周期时间分辨率。主要指气象卫星系列,以“h”为单位,可以用来反映一天以内的变化。如探测大气海洋物理现象、突发性灾害监测(地震、火山爆发、森林火灾等)、污染源监测等。

2) 中周期时间分辨率。主要指对地观测的资源环境卫星系列,以“d”为单位,可以用来反映月、旬、年内的变化。如探测植物的季相节律、旱涝灾害监测、气候学等。

3) 长周期时间分辨率。主要指较长时间间隔的各类遥感信息,用以反映“a”为单位的的变化。如湖泊消长、海岸进退、灾情调查、资源变化等。

(4) 辐射分辨率

辐射分辨率指传感器对光谱信号强弱的敏感程度、区分能力。即探测器的灵敏度——传感器感测元件在接收光谱信号时能分辨的最小辐射度差,或指对两个不同辐射源的辐射量的分辨能力。一般用灰度的分级数来表示,即最暗-最亮灰度值(亮度值)间分级的数目。

1.1.4 遥感的优势

1957 年第一颗人造地球卫星升空标志着人类进入太空时代,1960 年美国 TIROS-1 和 NOAA-1 的成功发射意味着航天遥感的开始。此后陆续有卫星上天,它们从不同的高度、不同的方面对地球进行多角度、多周期的观测。

与传统地面观测相比,卫星遥感具有如下优点:①观测范围大。具有综合宏观的特

点。单幅图像覆盖面积很大,便于进行地学大区域宏观观察与分析对比。②信息量大。它不仅可以获得可见光波段的信息,还可以获得紫外、红外、微波等超出人视觉以外的大量地学信息。③获取信息快,能对地表进行动态监测。如日本静止气象卫星 GMS 能每小时对东亚地区进行一次扫描。极轨卫星 NOAA 每天至少可以对同一地区进行两次覆盖。分辨率高于 1m 的商业遥感卫星 iKONOS 和 QuickBird 对同一地区的覆盖周期为 1~3d。这种动态监测的能力可以及时发现病虫害、洪水、污染以及火山地震等自然灾害发生的前兆。④遥感资料的计算机处理技术的广泛应用,使多种地学资料的综合分析、地学信息提取、地学数据库的建立有了技术上的保障。

1.2 热红外遥感

红外谱段指的是频率低于(或波长高于)可见光谱段以外,波长在 $0.76 \sim 1000\mu\text{m}$ 范围内,位于可见光和微波之间的区域。在这一范围内,辐射性质有很大的差异,既有反射红外波段波长 ($0.76 \sim 3\mu\text{m}$),又有发射红外波段 ($3 \sim 18\mu\text{m}$)。后者又称热红外。热红外遥感则是用遥感手段感应地面物体发射辐射能的差异。热红外遥感比可见光-反射红外遥感更复杂一些,其复杂性体现在:

1) 热红外遥感的大气影响更为复杂。它的大气效应除了有大气吸收、散射外,还有大气自身的发射,最主要的影响因素是大气的水汽和气溶胶,它们既要吸收能量又要自身发射热辐射能。这种大气自身的热辐射,叠加于地面物体的热辐射信号之上,使问题复杂化。

2) 热红外信息,除受大气干扰外,还受地表层热状况的影响,比如风速、风向及空气温度、湿度等。

3) 地物本身的热过程是复杂的。地物从热辐射的能量吸收(增温)到能量发射(降温)存在着一个热存储和热释放的过程。这个过程不仅与地物本身的热学性质(热传导率、热容量、热惯量等)有关,还与环境条件等多因素有关。

4) 热能的传递有多种方式(传导、对流、辐射)。改变地物温度的因素,除了热吸收与热辐射外,还有显热交换与潜热交换。所谓显热交换是指地表内部热量与大气的交换(加热空气),而潜热交换指地表水分蒸发的能量交换(降低地表温度)。

5) 热探测器所获得的物体发射辐射信息包含了两个重要的信息,即物体的温度以及表示物体辐射能力的比辐射率。温度与比辐射率的分离是热红外遥感的一个难点。

6) 热红外遥感图像的空间分辨率一般低于可见光-近红外遥感图像,因此混合像元(非同温像元)的问题显得相当突出。

1.3 应用卫星遥感技术研究地震前的热异常

卫星遥感技术在地震科学中的应用,早期主要集中在地震地质定性分析方面。近些年来,国内外一些地震学家相继提出并开始研究卫星遥感技术应用于地震预报的原理和方法,并在卫星遥感热红外临震预报方面开展了应用性研究和实践。

地表的热现象是研究地球内部活动的重要信息。许多学者对地表热异常与地质构造的关系进行了研究。在典型的大洋区,热流-地壳年龄-海底地貌之间呈良好的相关关系(Parsons et al., 1977)。在大陆地区,热流与构造活动性有关(Solater et al., 1980)。不同构造活动性的区域,热流分布不同。一般而言,构造活动越强烈,热流值越高。当某一地区地壳活动增强时(例如强地震前),地表的热流活动也会激增。

地震前出现的地面温度异常早被人们察觉,历史上亦不乏记载,不少人曾对其进行过研究。我国史料中记载了许多强震前出现的热异常现象。由于当时缺少测温仪器,调查有限,记载多为人的感受情况,且记载的仅是震前数天内的情况,如1679年9月2日北京平谷8级大地震前正逢“特大炎暑,热伤人畜甚重”;1920年12月16日宁夏海原8.6级特大地震“未震之先数日,四面天边变黄如火焰,晴空气燥,人均感觉焦灼干燥,不知何故”;1933年8月25日四川叠溪7.3级地震前“连日皆极晴朗炎热,震前尤甚”;1937年8月1日山东菏泽7级强震前一年“天气酷热,住房墙壁如烫,麦收时节脚踩麦秆感到热死人的程度”。

黄广思(1993)的研究表明,强震前在震中区较大范围内出现增温异常是一种普遍现象,这种增温异常不仅表现在气温上,还表现在地表温度和地表下浅层地温上,并且有以下几个特点:①时间长,分阶段。一般增温异常在震前数月到1年即有显示,1个月内明显,异常幅度随时间而增加,震前约10天持续增温,临震前1~2天幅度最大。②范围广,有分区性。异常区的面积多数为数千平方千米,个别达万余平方千米,异常幅度不一。早期分散成区块状相间分布,后期多集中成片,有自外围向震中发展的趋势。③幅度大,累积温度高。震前数月到1个月,增温幅度可达0.5℃左右,1个月内大于1℃,临震前几天多为2℃以上,有些超过10℃。

上述结果多从地表定点观测得到,能够较真实地反映震中局部地区的地面温度变化情况,但难于得到孕震范围内大面积的温度动态演变资料。随着遥感技术的发展,使人们可以迅速地获得大面积的热异常空间图像。连续的观测还可描绘出每一观测单元热能的变化过程。通过对卫星遥感信息的时空分析,不但可以识别地物构造,而且还可能依据热异常的变化过程分析地质构造的活动状态,发现地质灾害的前兆。

苏联的В. И. ГОРНЫЙ等人(1988)首先发现了震前热红外异常。此后,国内外许多学者分别在这一领域进行了大量的研究探索。

徐秀登、强祖基等(1991)利用卫星遥感热红外图像等资料对1989年的一些震例进行了研究,结果表明中强以上地震临震时,震区出现较大面积的持续增温是一种相当普遍的现象,不同的地区增温幅度不同,可能受纬度、局部地形和季节的影响。强祖基、徐秀登和赁常恭等通过大量解译对比卫星红外图像,结合异常与地质构造的定性关系,发现强地震前(几天至3月)出现的短临增温异常具有时间上的突发性、形态上的孤立性、分布上的局限性、异常昼夜对比具有稳定性、异常位置具有迁移性和演变规律具有阶段性。台湾集集地震和姚安地震都清楚地体现了这些特点(强祖基等,1990;徐秀登等,2000)。

Tronin(1996)用10000景NOAA卫星热红外影像对中亚地震活动带进行了研究,得出的结论是:热红外异常的活动性与中亚地震活动带之间具有统计上的相关性。在活动断层表面存在着稳定和不稳定的热红外辐射异常。异常增温可达到几摄氏度的量级,异常的形态为线性条带。

刘德富等(1997, 1999)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,取得较好的结果。1976年云南龙陵7.4级地震、河北唐山7.8级地震、四川松潘7.2级地震,1985年新疆乌恰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。2004年12月26日印度尼西亚8.7级特大地震前数月,印度洋东北部地区出现持续性的“长波辐射”通量增强的现象,震前的1~2个月到临震时,辐射异变在震中附近地区更加显著(刘德富等, 2005)。

邓志辉等(2003a, 2003b)通过对1999年9月21日台湾集集7.6级地震、2000年1月15日云南姚安6.5级地震、2000年6月6日甘肃景泰6.2级地震、2000年9月12日青海兴海6.6级地震和2001年11月14日昆仑山8.1级地震等的研究认为:不同构造区强地震前的卫星红外异常分布不同,沿海平原区表现为大范围的面状分布,而山区则以带状延伸为主;在强烈活动的断裂带,异常分布表现为与构造的密切相关性;地震震中常位于红外温度相对高值异常的边缘或附近,异常的发展具有非对称性,异常一般都是从震中附近的某一侧向震中区扩展;红外异常的时空分布规律在不同的地区是不同的,异常信息的提取要结合具体的构造条件、地理环境和气象因素进行分析。

Morozova(2000)研究了断层上遥感图像的线性云与地震发生的关系,发现震前线性异常密度增加。

吕琪琦、丁鉴海等(2000)对1998年河北张北6.2级地震研究,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。

马瑾等(2000)研究了1997年西藏玛尼7.9级地震前后震中周围地区地温图像的动态演化,研究证实了在玛尼地震前20天阿尔金断裂带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。地震后此增温异常条带逐渐消逝。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着一定的对应关系,说明两断层间存在相互作用以及变形异常-断层现今活动-地震三者之间有密切关系。

陈梅花、邓志辉等(2003)提出了通过对比不同构造部位的亮温动态变化差异挖掘地震前卫星红外异常的方法,发现2001年昆仑山8.1级大地震震前断层内外亮温差值存在显著异常,指出该地震前卫星红外增温与东昆仑断裂带存在明显的对应关系,地震前沿断裂带的红外增温大于其他地区。通过对2000年云南姚安6.5级地震和1997年西藏玛尼7.9级地震的研究,也得到了相似的结果(陈梅花等, 2007a)。

刘培洵等(2004)由热传导理论出发,根据地下热信号通过不同热扩散率材料传导到地表时将产生较大的时间差的特点,提出了提取地下热异常的新指标“透热指数”。

陈顺云等(2006)提出了利用地表热红外辐射信息研究现今构造活动的小波分析方法,将地表热红外辐射分解为高频、中频、低频3个频率成分,其中低频成分的热异常更接近于断层活动所引起的热信息,低频成分的高温异常区(条带)同构造特征、地震活动密切相关。

Dey et al.(2003)利用卫星遥感资料研究强震前后的潜热变化,注意到沿海地区强地震前普遍存在潜热通量异常,而内陆地区的地震前则没有类似的异常现象。潜热通量异

常的大小和震级有很好的相关性,并且与发震区域、发震季节、震中距离海洋的远近关系密切。陈梅花和邓志辉等(2006)的研究也发现2004年12月26日印度尼西亚8.7级大地震前存在显著的潜热通量异常,异常的分布与地震破裂非常一致。

卫星红外异常与潜热通量异常是地震前热异常的不同表现形式,它们可以伴生出现,具体表现为空间上互补和时间上相随(陈梅花等,2007b)。

1.4 卫星红外亮温背景场的研究

卫星红外亮温是地表诸因素热辐射的综合反映,它受到季节、高程、纬度和植被等诸多非构造因素的影响,在正常(无震)情况下亮温也是不均匀分布的,仅凭遥感图像上亮温的高低无法确定是否存在异常,更难分清构造异常与非构造异常。异常的判定必须建立在了解正常背景的基础上。因此,研究正常情况下亮温的变化规律,即亮温背景场动态,是必要和迫切的。

目前亮温背景场的研究多是针对个别震例,为了提取震前红外异常的需要而进行的。苏联的В. И. ГОРНЫЙ等人(1988)提取中亚地震活动区的震前热红外异常时,是以该地区线性构造(科彼特、塔拉斯-费尔干及其他断裂)相邻断块的亮温作为背景场,将断裂带内的亮温与其相邻断块亮温相比较,提取震前红外异常。

强祖基等(1990)研究1989年10月山西大同5.7级和6.0级地震震前红外异常时,以该地区同一季节正常情况下的亮温值作为背景场,将震前几天的亮温与其相比较,追踪震前的热红外异常。

徐秀登等(2000)研究1999年台湾南投7.6级地震震前红外异常时,把台湾东部洋面的整体亮温作为背景场,在红外亮温分布整体背景上发现孤立的增温异常区。

吕琪琦、丁鉴海等(2000)对1998年河北张北6.2级地震研究,以地震之前近期地震相对平静、无干扰的某一天的图像的亮温值作为背景场,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。

陈梅花、邓志辉等(2003, 2007a)用断裂带内外温差值分析法提取2001年昆仑山8.1级地震、2000年云南姚安6.5级地震和1997年西藏玛尼7.9级地震的震前热红外异常信息。该方法以断裂带外15~30km的亮温作为背景场,用离断裂带15km范围内的地区的亮温与背景场进行差值,提取震前红外异常。

陈顺云等(2004)利用分离窗法和小波分析方法提取了中国地表亮度温度的年变基准场。

陈梅花和邓志辉等(2006, 2007b)研究2004年印度尼西亚8.7级地震和2005年江西九江5.7级地震前后的潜热通量动态,以25年的平均值为背景、1.5倍均方差为阈值,揭示出了异常的存在。

1.5 存在的问题

目前,对卫星红外亮温背景场缺少系统的研究,多是围绕个别震例,为了提取地震前

红外异常的需要而进行的。不同的作者针对不同的地震,为了达到提取和突出热异常的目的,可能使用非常不同的红外亮温背景场,对其物理含义、时空变化规律和影响因素不甚了解,导致异常分析结果非常混乱,难于给出正确的评价。

在红外亮温背景场的空间分布上,对不同地区存在的差异认识很含糊,在红外亮温异常识别时,对不同地形、地貌和介质的地区出现异常的背景把握不准,结果是有时把干扰当异常,出现大量虚报,有时则把异常当干扰,导致错误的漏报。还有的把亮温、OLR、潜热通量等异常孤立起来看待,丢失了一些重要的关联信息。

在红外亮温背景场的时间动态上,对不同季节、不同时段存在的差异缺少具体的定量数据,在红外亮温异常识别时,对不同季节、不同时段用一个标准来衡量,结果是有时是背景太低异常范围过大,无法圈定有意义的危险区,有时则背景太高异常被掩盖,无法获取有用信息。

在红外亮温背景场的取值上,由于对其时空变化规律和影响因素认识不深入不全面,在红外亮温异常识别时,经常很随意地把地震前某一时次或某一时间段的数据作为背景值,所得到的结果无法评价,更难推广应用。

除上述问题外,更加严重的问题是卫星红外传感器能否观测到地震引起的热异常;卫星遥感图像受到气象、地理、介质和植被等许多因素的影响,来自地下的热信息能否在复杂的亮温背景中显露出来。

1.6 研究内容

人们对地震红外异常研究已有十多年了,已经积累了一定的震例和资料,也发现了大量的问题,现在应该是深入研究背景场的时候了。本书将针对上述卫星红外亮温背景场研究和应用中存在的一些问题,自主研发遥感图像处理、红外亮温数据分析软件,研究中国红外亮温背景场的时空分布规律,对其主要影响因素进行定量、半定量分析。本书的研究内容主要包括如下几个方面:

- 1) 自主研发遥感图像处理、红外亮温数据分析软件。
- 2) 系统研究中国卫星红外亮温背景场(每月最大值和平均值)的时空分布规律,并分析其主要影响因素。
- 3) 定量研究亮温背景场的影响因素之一——高程与亮温的关系。
- 4) 研究亮温背景场的另一影响因素——大地热流与亮温的关系,探讨利用卫星红外遥感技术观测和分辨地震热异常信息的可能性。
- 5) 对研究结果进行总结,对存在的问题进行分析。

2 卫星遥感热辐射的原理

2.1 热辐射原理

从理论上讲,自然界任何温度高于热力学温度(0K或-273℃)的物体都不断地向外发射电磁波,即向外辐射具有一定能量和波谱分布位置的电磁波。其辐射能量的强度和波谱分布位置与物质的表面状态有关,它是物质内部组成和温度的函数。正因为这种辐射依赖于温度,因此称为“热辐射”(赵英时等,2003)。对地表物体而言,这种辐射的电磁波主要处在大于 $3\mu\text{m}$ 的中远红外波谱区,另外在微波谱段也有少量的热辐射。卫星遥感利用星载或机载传感器和相关设备收集、记录和传输地物的这种热辐射信息,并利用这种热辐射信息来识别地物和反演地表参数,例如温度、湿度和热惯量等。这里首先对一些常用的基本概念与术语的物理意义做一说明。

1) 辐射能量。指以电磁波形式向外传送能量,常用 Q 表示,单位为J(焦)。

2) 辐射通量。又称辐射功率,指单位时间内通过某一表面的辐射能量,常用 Φ 表示,单位为W(瓦),即J/s(焦/秒),表达为

$$\Phi = dQ/dt \quad (2.1)$$

3) 辐射出射度。又称辐射通量密度,指面辐射源在单位时间内,从单位面积上辐射出的辐射能量,即物体单位面积上发出的辐射通量,常用 M 表示,单位为 W/m^2 (瓦/米²),表达为

$$M = d\Phi/dA \quad (2.2)$$

4) 辐射照度。简称辐照度,指面辐射源在单位时间内,从单位面积上接收的辐射能量,即照射到物体单位面积上的辐射通量,常用 E 表示,单位为 W/m^2 (瓦/米²),表达为

$$E = d\Phi/dA \quad (2.3)$$

5) 辐射强度。指点辐射源在单位立体角单位时间内,向某一方向发出的辐射能量,即点辐射源在单位立体角内发射的辐射通量,常用 I 表示,单位为 W/sr (瓦/球面度),表达式为

$$I = d\Phi/d\omega \quad (2.4)$$

6) 辐射亮度。简称辐亮度,指面辐射源在单位立体角单位时间内,在某一垂直于辐射方向单位面积(法向面积)上辐射出的辐射能量,即辐射源在单位投影面积上、单位立体角内的辐射通量,常用 L 表示,单位为 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ (瓦/米²·球面度)表达式为

$$L = d^2\Phi/d\omega \cdot dA\cos\theta \quad (2.5)$$

2.1.1 黑体的辐射

“黑体”是个假设的理想辐射体,一个完全的吸收体和发射体。它吸收和重新发射它

所接收到的所有能量（没有反射）。实际上，自然界并不存在黑体，但它的行为表现能够被实验室的设备所模拟。它在描述一般物体的热行为、研究物体温度与发射能的关系时是有用的。由于热辐射是随着物体的组成物质和条件的不同而变化的，因而需要引入“黑体”作为理解热辐射过程和热辐射定量研究的基准。下面是黑体辐射的几个基本的定律：

(1) 普朗克辐射定律

该定律描述了黑体辐射的辐射出射度（ M ）是温度（ T ）和波长（ λ ）的函数，普朗克辐射定律可表示为

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \tag{2.6}$$

式中： h 为普朗克常数， $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ； c 为光速， $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ； k 为玻耳兹曼常数， $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； T 为绝对温度（K）； λ 为波长（m）。

(2) 斯特藩－玻耳兹曼辐射定律

任一物体辐射能量的大小是物体表面温度的函数。斯－玻定律表达了物体的这一性质。此定律将黑体的总辐射出射度与温度的定量关系表示为

$$M(T) = \sigma T^4 \tag{2.7}$$

式中： $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ，称为斯－玻常数； $M(T)$ 为黑体表面发射的总能量即总辐射出射度（ W/m^2 ）； T 为黑体温度（K）。此式表明黑体发射的总能量与绝对温度的四次方成正比。

(3) 维恩位移定律

此定律描述了物体辐射的峰值波长与温度的定量关系为

$$\lambda_{\max} = A/T \tag{2.8}$$

式中： $\lambda_{\max}$ 为最大辐射强度所对应的波长（ μm ）； A 为常数，取值为 $2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ； T 为绝对温度（K）。此式表明黑体最大辐射强度所对应的波长 $\lambda_{\max}$ 与黑体的绝对温度 T 成反比。

可见，物体热辐射的强度和峰值波长都是随着物体的温度而变化的。温度确定后，根据普朗克定律、维恩定律可以确定辐射源的光谱分布，推算出物体的峰值波长；根据斯特藩－玻耳兹曼辐射定律可以计算出物体辐射的总功率。反之，从物体的光谱分布及辐射总功率也可以推算出“实际温度”。因此，可以通过对地表辐射能量的测量或运用遥感观测获得的热图像数据，间接获得目标对象的“温度”信息。

2.1.2 真实物体的辐射

真实物体并非黑体。它的辐射出射度小于同温下黑体的辐射出射度。因而引出了“比辐射率”的概念，又称发射率，用 $\varepsilon(T, \lambda)$ 表示。比辐射率被定义为物体在温度 T 、波长 λ 处的辐射出射度 $M_s(T, \lambda)$ 与同温度、同波长下的黑体辐射出射度 $M_B(T, \lambda)$ 的比值。即

$$\varepsilon(T, \lambda) = \frac{M_s(T, \lambda)}{M_B(T, \lambda)} \tag{2.9}$$

比辐射率是一个量纲为一的量，介于 0~1 之间。它是波长 λ 的函数，由材料性质决定，通常在较大的温度变化范围内为常数，故常不标注为温度的函数。

物体的比辐射率是物体发射本领的表征。它不仅依赖于地表物体的组成成分，而且与

物体的表面状态（表面粗糙度等）及物理性质（介电常数、含水量、温度等）有关，并随着所测定的辐射能的波长及观测角度等条件的变化而变化。

考虑到比辐射率的存在，当计算真实物体的总辐射出射度时，把斯特藩 - 玻耳兹曼辐射定律修正为

$$M(T) = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2.10}$$

式中： $M(T)$ 为总辐射出射度 (W/m^2)； T 为物体真实温度 (K)； σ 为斯 - 玻常数，取值 $5.6697 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ； ε 为物体的比辐射率。

式 (2.10) 说明，物体辐射电磁波能量的强度与物体的比辐射率及表面温度有关。

2.1.3 热辐射传输

太阳辐射是地表发射能量的主要来源。地面吸收太阳短波能量（包括太阳直射光和天空漫射光）开始升温，将部分太阳能转化为热能，然后地面再向外辐射较长波段的热红外辐射能量。在热红外遥感的地 - 气辐射传输中，地面与大气都是热红外辐射的辐射源，辐射能多次通过大气层，被大气吸收、散射与发射，因此研究地面热红外辐射需要对大气的干扰进行纠正。图 2.1 为热红外遥感的地 - 气辐射传输示意图，它表达了热红外辐射的传播方向及相互作用的过程。

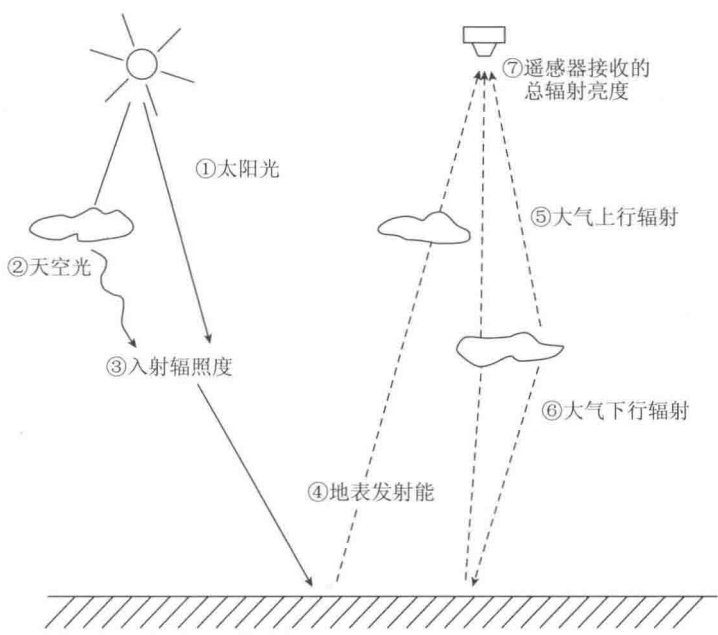


图 2.1 地 - 气辐射传输示意图

假设地表和大气对热辐射具有朗伯体（辐射源各方向上的辐亮度不变）性质，大气下行辐射强度在半球空间内为常数，热辐射传输方程为

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s) \varepsilon_{\lambda} \tau_{0\lambda} + L_{0\lambda}^{\uparrow} + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{0\lambda}^{\downarrow} \tau_{0\lambda} \tag{2.11}$$

式中： L_{λ} 为传感器所接收的波长 λ 的热红外辐射亮度； $B_{\lambda}(T_s)$ 为地表物理温度 T_s (K) 时的普朗克黑体辐射亮度； ε_{λ} 为波长 λ 的地表比辐射率； $\tau_{0\lambda}$ 为从地面到遥感器的大气透过率； $L_{0\lambda}^{\uparrow}$ 、 $L_{0\lambda}^{\downarrow}$ 为波长 λ 的大气上行辐射、大气下行辐射。