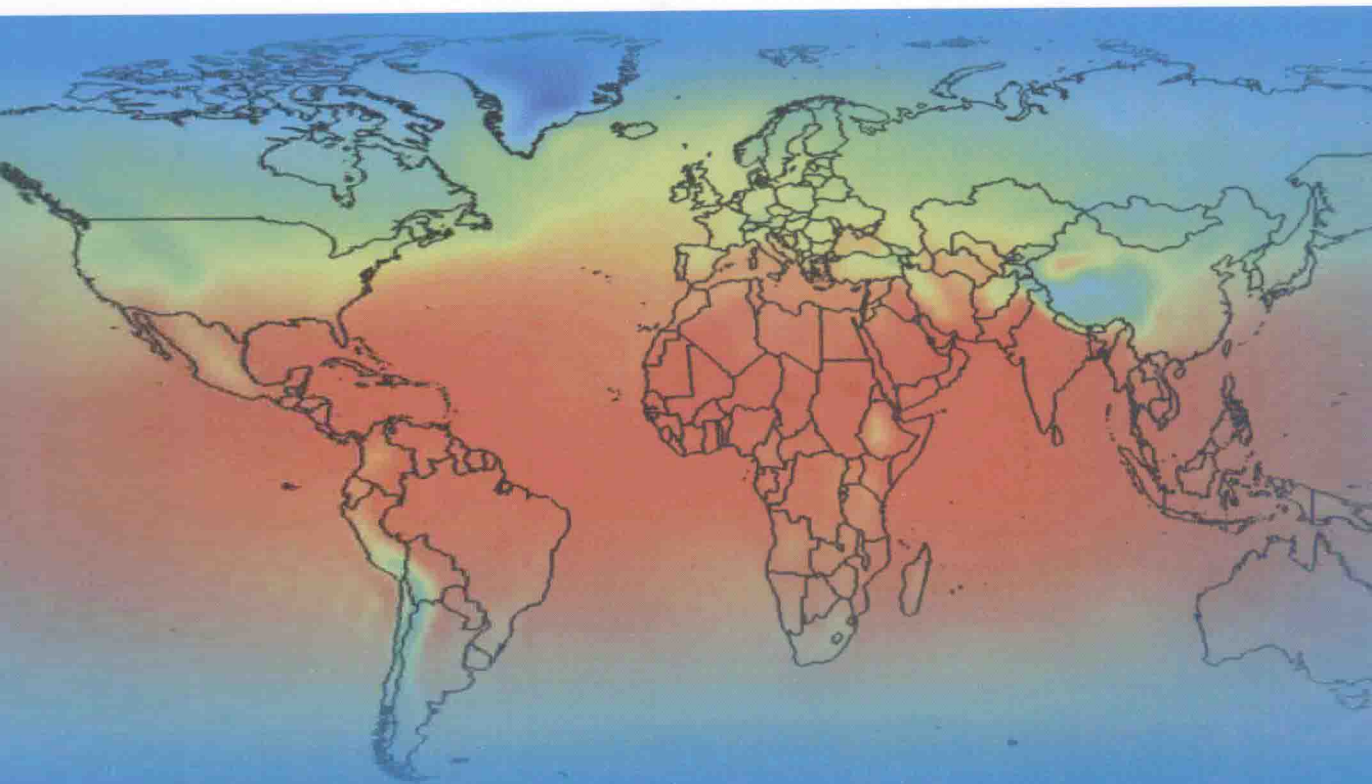


地震红外遥感

孟庆岩 康春丽 申旭辉 荆 凤 著



地震出版社

地震红外遥感

孟庆岩 康春丽 申旭辉 荆 凤 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震红外遥感 / 孟庆岩等著. —北京: 地震出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-5028-4259-8

I. ①地… II. ①孟… 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 (2013) 第 085135 号

地震版 XM2294

地震红外遥感

孟庆岩 康春丽 申旭辉 荆 凤 著

责任编辑: 王秋月

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2014 年 5 月第一版 2014 年 5 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 301 千字

印张: 11.75

印数: 0001~1000

书号: ISBN 978-7-5028-4259-8/P (4948)

定价: 68.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

序一

我国是全球陆内地震最为严重的国家，地震活动频度高、强度大、分布广。近年，我国连续发生 2008 年“5·12”汶川特大地震、2010 年“4·14”玉树大地震、2013 年“4·20”芦山大地震等多个地震，造成巨大人员伤亡和财产损失。据中长期地震研究，未来 10 年我国大陆仍可能发生多次高震级地震，对我国人民生命财产将会造成极大威胁。加强地震预测预报研究，提高其成功率和准确性，是关乎国家发展和人民生命财产安全的重大课题，是我国地震研究的历史使命，对遥感科技工作者而言，无疑也是一个探索追逐的重要目标。

随着航天技术和遥感技术的快速发展，我国已建立由气象卫星、海洋卫星、陆地资源卫星、环境减灾卫星等卫星系列组成的空间对地观测系统，卫星的业务运行正稳步开展，卫星应用正在逐步深化。近年来，《国家中长期科学和技术发展规划纲要》（2006~2020 年）中 16 个重大科技专项之一的“高分辨率对地观测系统”正在全面建设，国家空间基础设施正在规划，与地震监测研究相关的卫星，如电磁探测卫星也已立项。与此同时，国外多种卫星也在持续不断地对地球进行观测。这是极其宝贵的空间资源，必将对我国地震研究提供更大支撑，也必将对地震预测预报和预警产生重大促进作用。

地震预测预报是世界性难题，其有效破解除有赖于对地球动力学和地震理论和实践的重大突破外，一些交叉相邻学科和新技术新方法的突破也同样会对地震问题的解决有重要裨益，以地震研究为目标的红外遥感有望成为这一多学科攻关队伍中的一支突击队。地震发生前常伴随有热异常，这一现象已从假设到实践、从历史到现今一直为人们所关注，并开展过长期研究。囿于技术原因，无论是对其机理的求证还是对探测效果的检验都尚未取得重大突破。卫星红外遥感技术的发展为瞬时探测大范围近地空间热场的变化提供了技术实现的可能，为开展地震短临预报从而提升地震热异常监测能力，提高地震综合预报

的成功率和准确性提供了一种新的技术途径。近 20 年,我国地震学者积极利用热红外遥感技术进行地震监测预测研究,取得了很好进展,其研究成果为国际学界所关注,有些成果已为地震预测预报业务提供了重要参考,展现了它的应用前景。

孟庆岩、康春丽、申旭辉、荆凤等学者所著的《地震红外遥感》一书,是国内第一部系统论述地震红外遥感技术的论著,是作者及其团队和我国科学家在这一领域长期从事地震红外遥感研究与实践的系统总结。在书中,著者利用红外遥感技术全天候、周期短、分辨率高、动态性强等优点,研究发展了亮度温度、长波辐射、潜热通量等地震红外异常多参量提取方法,并基于大量震例,研究了地震活动区多参量背景场及地震红外异常时空演化特征,研究了红外辐射异常与地震的紧密关系,为地震监测、预测和预报探索了一种新方法和新途径。

该书紧密结合地震监测预测业务需求,从机理、技术和方法等方面系统介绍了国内最新的地震红外遥感研究成果,具有较高的学术水平和应用实践的参考价值。

《地震红外遥感》一书的出版对我国地震红外遥感研究和探索,并融入地震预测预报和预警业务具有重要推动作用。我相信,地震红外遥感与其他多种技术方法相结合,优势互补、取长补短,一定会对我国地震短临预报事业的发展 and 突破发挥重要作用。这里,我对本书作者们的辛勤劳动、刻苦钻研、锲而不舍的精神以及他们所取得的成果深感欣慰,盼望我国有更多中青年学者投身地震遥感研究,探索这一世界性难题。衷心祝愿他们取得更大成绩,为推动我国地球科学观测技术与地震研究事业发展做出更大贡献。

欣慰之余,谨此为序。



2014 年 3 月

序二

1966年邢台地震后，我国开始了较为系统的地震预报研究。经历了几代地震科学家们的辛勤努力与探索，建成了相对完善的地面监测系统，形成了一套独特的地震预测预报思路，并取得了几次成功的预报实践。然而，由于我国幅员辽阔、自然条件复杂，特别是在我国西部强震活动较为频繁地区，观测台站密度十分稀疏，使相应地区地球物理场等相关信息的获取和分析受到限制。近年来我国发生的几次破坏性地震如汶川8.0级、玉树7.1级以及芦山7.0级地震等，再次表明地震活动的突发性和灾难性。因此，寻找和探索新的预测方法和途径，具有十分重要的意义。

空间技术的不断发展，为全方位获取连续可靠的地球物理场变化提供了技术保障。其中，卫星红外遥感技术以覆盖面积大、可全天候、全天时获得大面积稳定连续的地球物理场资料等优势，在一定程度上弥补了地面离散观测台站的不足，将有望成为地震预报研究中重要的技术手段。已有的研究表明，强震前孕震区的热异常是一种值得重视的前兆现象，地震研究抓住热红外异常动态变化开展短临预报研究，有可能为地震预测做出贡献。本著作系统阐述了与地震有关的红外遥感问题。著作着重介绍红外遥感的基本原理，地震红外的遥感机理、监测思路和现状，并详细阐述了地震监测中红外遥感数据的处理，地震信息的提取以及多参数综合分析方法。对于在地震监测预报中实际震例给予了充分的收集与恰当的表述。本著作作为后人在这一领域的推进具有重要的参考价值。

地震预测确实是一个世界性难题，有不少人至今都怯于涉足。本书作者们悉心研究，通过自己长时间的投入为这一领域提供了重要的信息；本著作的出版，对在这一领域的同仁具有极大的鼓舞。

但本序撰写人，在此不得不谨慎小心地提出：我们见到的前兆（包括本著作以外的多种前兆）发生的时空窗口为什么总是不能落到地震发震点（时空点）上呢？这是今日我们必须严肃认真思考的问题。

许绍燮

2014年3月

前 言

地震是破坏力最大、危害性最强的突发性自然灾害。一次大地震往往给人类生命财产和社会经济发展带来毁灭性破坏。我国是全球地震灾害最为频繁的国家之一，地震活动具有频度高、震级大、分布广、灾害强的特点，潜在的巨大地震灾害严重威胁着我国的公共安全和社会稳定。近年来，全球灾难性地震事件频繁发生，政府和公众都迫切希望能够在震前做出一定程度的预报。但由于受到观测技术的限制以及对地震孕育发生机理认识的局限性，一些关键的科学问题尚未解决。目前，我国的地震预报主要基于大量震例的经验性总结，虽取得一些成功实例，但总体预报水平偏低，地震预报水平的提高亟需探索新的观测技术和方法。

卫星红外遥感技术能够探测到大范围连续的近地表辐射场变化，为开展地震预报研究提供了新的技术途径和思路。正是因为认识到红外遥感的强大潜力与优势，近 20 年来国内外地震专家积极开展了利用红外遥感技术进行地震预报研究的尝试，并取得一定进展。大量震例研究证明，将红外遥感引入地震预测切实可行且十分必要，有望成为一种极具前景的地震预测新方法。然而，作为地震预测新方法的一种探索，尽管地震红外遥感技术已引起众多学者的广泛关注并取得一定进展，但仍有诸多关键技术和科学难题尚需深入探索。例如，不同地震构造区红外信息的动态背景场构建、地震红外异常变化信息的提取等。

本书是对地震红外遥感团队多年研究成果的一次系统总结，在探索地震预报新思路、新方法以及基础理论应用研究方面具有一定创新性。全书共分 6 章，第 1 章简要介绍了红外遥感的基本原理及应用、地震红外遥感监测的基本思路、研究现状以及关于地震红外机理的几种假说；第 2 章描述了针对地震监测需求开展遥感数据预处理的方法，包括大气校正、云检测和地形辐射校正等；第 3 章对地表温度、亮度温度、长波辐射、潜热通量、大气温度等几种红

外参量的反演理论和方法进行了论述；第4~5章针对红外亮度温度、长波辐射、潜热通量、大气温度等数据，介绍了基于不同构造区的背景场构建技术以及建立在典型震例研究基础上的异常信息提取方法；第6章主要介绍了基于以上几种参量进行地震红外遥感多参数综合分析的基本思路和方法以及开展的一些应用试验结果和效果分析。

本书第1章由孟庆岩、申旭辉、荆凤、熊攀、赵利民编写；第2章由孟庆岩、程天海、韩杰、熊攀、赵利民、陈志明、韩春峰、杨珊荣、吴俊、龙明涛撰写；第3章由孟庆岩、荆凤、屈春燕、李家国、马未宇、熊攀、赵利民、詹雅婷、陈瀚阅、卢显撰写；第4~5章由荆凤、屈春燕、李志雄、张元生、刘放、康春丽、李美、马未宇、熊攀、闫丽莉、温少妍撰写；第6章由李志雄、马未宇、康春丽、李美、荆凤、屈春燕、孙珂、闫伟撰写；全书由孟庆岩、康春丽、申旭辉、荆凤统稿。

本书得到了国家“十一·五”科技支撑计划课题“基于卫星热红外遥感的地震综合信息处理与应用技术研究”、高分辨率对地观测系统重大科技专项“高分遥感地震监测与应急应用示范项目”的资助。衷心感谢中国科学院院士童庆禧先生和中国工程院院士许绍燮先生为本书作序，感谢他们对地震红外遥感研究团队的关心和指导。本书还得到中国地震局科技司栾毅巡视员、中国科学院遥感与数字地球研究所顾行发研究员、余涛研究员等的大力支持，中国科学院遥感与数字地球研究所田国良研究员和中国地震局地震预测研究所刘德富研究员通阅全书并提出宝贵意见，在此表示衷心感谢。本书由著者所在研究团队集体完成，衷心感谢所有科研人员和研究生的辛勤努力。

本书是基于著者研究团队的科研积累提炼浓缩而成，抛砖引玉，盼望为地震遥感专家和爱好者提供些许参考。地震红外遥感研究是一个复杂的科学难题，加之著者水平有限，书中疏漏、疑惑谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

著 者

2014年3月于北京

目 录

第 1 章 地震红外遥感概论	(1)
1.1 红外遥感基本概念与定律	(1)
1.1.1 表征辐射特性的基本概念	(1)
1.1.2 红外辐射的基本定律	(3)
1.2 地震红外遥感机理	(5)
1.2.1 地球放气	(5)
1.2.2 地壳应力应变	(5)
1.2.3 电场激发大气红外辐射	(6)
1.3 地震红外遥感监测思路	(6)
1.4 相关红外传感器	(7)
1.5 国内外地震红外遥感研究现状	(8)
1.5.1 基于亮度温度的地震红外异常研究	(8)
1.5.2 基于长波辐射的地震红外异常研究	(9)
1.5.3 基于潜热通量的地震红外异常研究	(10)
1.5.4 基于 NCEP 气温的地震红外异常研究	(10)
1.6 本章小结	(11)
第 2 章 地震监测中的红外遥感数据预处理	(14)
2.1 地震监测中红外遥感数据的大气校正	(14)
2.1.1 大气校正概述	(14)
2.1.2 红外大气校正原理	(15)
2.1.3 红外大气校正方法	(23)
2.2 地震监测中的遥感影像云检测方法	(29)
2.2.1 云检测概述	(29)
2.2.2 云检测理论基础	(30)
2.2.3 多源遥感数据云检测算法及应用	(32)
2.3 地震监测中地形辐射校正方法	(42)
2.3.1 地形辐射校正方法概述	(42)
2.3.2 地形辐射校正模型	(44)
2.3.3 地形辐射校正算法研究与改进	(47)
2.3.4 地形辐射校正应用实例	(51)
2.3.5 热红外遥感地形辐射校正	(53)

2.4 本章小结	(53)
第3章 地震红外遥感参数及反演	(57)
3.1 亮度温度	(57)
3.1.1 亮度温度的物理含义	(57)
3.1.2 亮度温度反演	(57)
3.1.3 亮度温度的影响因素	(58)
3.2 地表温度	(60)
3.2.1 地表温度的物理含义	(60)
3.2.2 地表温度反演	(61)
3.3 长波辐射	(63)
3.3.1 长波辐射的物理含义	(63)
3.3.2 长波辐射反演	(64)
3.3.3 长波辐射的影响因素	(65)
3.4 潜热通量	(67)
3.4.1 潜热及潜热通量的物理含义	(67)
3.4.2 潜热通量反演方法	(68)
3.4.3 潜热通量的影响因素	(69)
3.5 NCEP	(70)
3.5.1 NCEP 来源及特点	(70)
3.5.2 NCEP 同化方法	(70)
3.5.3 NCEP 同化的影响因素	(71)
3.6 本章小结	(71)
第4章 地震红外遥感背景场	(74)
4.1 背景场研究意义	(74)
4.2 背景场建立思路	(74)
4.3 中国主要构造区红外背景场特征研究	(76)
4.3.1 构造区概况	(76)
4.3.2 红外背景场建立方法及区域背景场特征分析	(78)
4.4 关于背景场的一些思考	(93)
4.5 本章小结	(95)
第5章 红外遥感地震信息提取方法	(96)
5.1 亮度温度地震信息提取方法	(96)
5.1.1 参量简介	(96)
5.1.2 亮度温度地震信息提取方法及震例分析	(97)
5.1.3 亮度温度地震信息特征	(107)
5.1.4 亮度温度与气温、地温的对比研究	(110)

5.2	长波辐射地震信息提取方法	(119)
5.2.1	参量简介	(119)
5.2.2	长波辐射地震信息提取方法及震例分析	(119)
5.2.3	长波辐射地震信息特征	(128)
5.3	潜热通量地震信息提取方法及震例分析	(137)
5.3.1	参量简介	(137)
5.3.2	潜热通量地震信息提取方法及震例分析	(138)
5.3.3	潜热通量地震信息特征	(139)
5.4	NCEP 气温地震信息提取方法	(141)
5.4.1	参量简介	(141)
5.4.2	NCEP 气温数据地震信息提取方法及震例分析	(142)
5.4.3	NCEP 气温地震信息特征	(144)
5.5	本章小结	(145)
第 6 章	地震红外遥感多参数综合分析	(147)
6.1	红外遥感多参数及其与地震活动的相关性	(147)
6.1.1	红外遥感多参数相关性分析	(147)
6.1.2	红外遥感多参数与地震活动的相关性	(147)
6.2	典型震例的红外多参数异常特征分析	(148)
6.2.1	玉树地震前红外遥感多参数变化特征	(148)
6.2.2	文安地震前红外遥感多参数变化特征	(152)
6.2.3	普洱地震前红外遥感多参数变化特征	(157)
6.3	红外遥感各参数映震效能分析	(161)
6.4	红外遥感多参数综合分析及应用试验	(164)
6.4.1	开展的预测应用试验及效果分析	(164)
6.4.2	多参数综合分析方法	(166)
6.4.3	2013 年 4 月 20 日芦山 M7.0 地震的预报实例	(168)
6.5	本章小结	(169)
后 记		(171)

第 1 章 地震红外遥感概论

红外遥感是利用遥感手段观测和研究地表温度、地表热辐射时空特征及其应用的一个遥感学科分支。在红外遥感研究的初始阶段,即 20 世纪 60 年代末,主要是直接利用星上观测值区分相对温度高低,但难以定量确定温度值。随着应用需求的深化,红外遥感获得高度重视。在 70 年代前期,开始利用红外遥感数据进行温度值计算,形成了红外遥感基本理论方法。本章着重介绍红外遥感的基本原理,并详细探讨地震红外遥感机理、监测思路和研究现状。

1.1 红外遥感基本概念与定律

地表物体能够反射、透射和发射各种不同波长的电磁波,而不同波长的电磁波所携带的地物波谱特征信息及其空间结构信息是不同的,因此可以利用不同波长的电磁波效应达到识别物体某些特性的目的(田国良,2006)。例如,可以利用无线电波传送信息,利用 X 射线穿透物质的能力进行零件探伤,利用热射线传递热能等。人们根据电磁波不同效应把电磁波分成若干波段:0.38~0.76 μm 的电磁波段称为可见光波段;0.76~1000 μm 的电磁波段称为红外波段(一般将红外波段又分为近红外波段(0.76~1.3 μm)、短波红外波段(1.3~3.0 μm)、中红外波段(3.0~8.0 μm)、热红外波段(8~14 μm)和远红外波段(14~1000 μm));波长大于 1000 μm 的电磁波段称为无线电波段(根据其波长的不同又可分为雷达、视频和广播三个波段)([日]遥感研究会编,1993)。

1.1.1 表征辐射特性的基本概念

遥感成像的本质是电磁辐射与地表相互作用的一种记录。由于热辐射遥感研究中同时涉及到光学、光谱学、辐射换热等多方面的知识,不同领域同一现象往往有不同的名称(陈述彭,1990)。为方便查阅,本书首先介绍表征辐射特性的基本概念。

1.1.1.1 辐射通量 Φ

在单位时间内通过某一表面的辐射能量 Q (单位: J) 称为辐射通量 (Radiant Flux) Φ , 单位是 W。

1.1.1.2 辐射通量的空间密度 F

在单位时间内通过单位面积的辐射通量,称为辐射通量的空间密度 F , 单位是 W/m^2 。当具体考虑辐射的发射和入射时,可分别使用辐射出射度和辐射照度。

1.1.1.3 辐射出射度 M 与辐射照度 E

在单位时间内,从单位面积上辐射出的辐射能量称为辐射出射度 M ,单位是 W/m^2 。其意义是:在单位面积 (m^2) 上的辐射功率 (W)。

1.1.1.4 点辐射源的辐射强度 I

点辐射源在某一给定方向 θ 上单位立体角内的辐射通量,称为辐射强度 (Radiant Intensity) $I(\theta)$,单位是 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。 $I(\theta)$ 表示点辐射源单位时间内在 θ 方向的单位立体角内所发射的能量。

1.1.1.5 面辐射源的辐射亮度 L

辐射源在某一方向的单位投影面积在单位立体角内的辐射通量,称为辐射亮度 (Radiance) $L(\theta)$,单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。辐射亮度 $L(\theta)$ 是有方向的, θ 是面元的法线与辐射方向之间的夹角。 $L(\theta)$ 表示辐射源在方向 θ 上,垂直于该方向的单位投影面积上在单位时间、单位立体角内所发射的能量。

点辐射源辐射能力的测量仅适用于辐射强度;面辐射源,尤其是在考虑微分面元或有限面积的辐射时,既可以用辐射强度,也可以用辐射亮度。此时,对于那些辐射亮度 $L(\theta)$ 与 θ 无关的辐射源,称为朗伯源。朗伯源的辐射强度满足:

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos(\theta) \quad (1.1)$$

朗伯源的辐射亮度 L 等于 $\theta=0^\circ$ 时的辐射强度 I_0 。单位面积朗伯辐射源向 2π 空间的总辐射出射度 M 为 πL 。

对于平行辐射,辐射能是在同一方向传播的,射线所张的立体角为零,不能应用辐射亮度的概念。一个接受平行辐射的表面,所得到的辐射能量只取决于该面与射线垂直方向上的投影面积。

1.1.1.6 辐射光谱和辐射通量的谱密度

太阳、地球及大气等不同物体发射(吸收)的性质不同,它们的辐射能量随波长的分布互不相同。例如,大气主要在红外波段发射,且能量随波长的变化明显;太阳辐射的能量随波长的变化比较连续,主要集中在可见光波段。设一个物体的辐射出射度为 M ,在波长 λ 至 $\lambda+d\lambda$ 间隔的辐射能为 dM ,则:

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \quad (1.2)$$

M_λ 为单位波长间隔中的辐射出射度,是波长的函数,称为分光辐射出射度,或辐射通量谱密度。不同辐射性质的物体,其 M_λ 有不同的函数形式。 M_λ 不仅取决于物体的性质,而且取决于物体所处的状态,如温度等。

1.1.1.7 吸收率、反射率和透过率

一般而言,投射至物体的辐射能一部分会被物体吸收转变为物体的内能或其他形式的能量,一部分会被反射回去,一部分会穿透物体射出去。投射至物体的辐射能为 Q_0 ,其中被吸收部分为 Q_A ,被反射的部分为 Q_R ,透射出去的部分为 Q_T ,各部分能量遵守能量守恒原理,即:

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_T \quad (1.3)$$

物体的吸收率 α 表征该物体吸收辐射能量的能力,等于被吸收的能量除以投射至物体的总能量:

$$\alpha = Q_A / Q_0 \quad (1.4)$$

物体的反射率 ρ 表征该物体反射辐射能量的能力, 等于被反射出去的能量除以投射至物体的总能量:

$$\rho = Q_R / Q_0 \quad (1.5)$$

物体的透过率 τ 表征物体透射辐射能量的能力, 等于透射出去的能量除以投射至物体的总能量:

$$\tau = Q_T / Q_0 \quad (1.6)$$

根据能量守恒原理, 有

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.7)$$

1.1.1.8 黑体和灰体

如果某一物体对任何波长的辐射都全部吸收, 即 $Q_{A,\lambda} = Q_{0,\lambda}$, A_λ 不随波长而变, $A_\lambda = 1$, $R_\lambda = 0$, $T_\lambda = 0$, 则称该物体为绝对黑体。如果只是对某一波长来说 $A_\lambda = 1$, 则称之为对该某波长是黑体。

绝对黑体在自然界中是不存在的, 但在理论上有着重要地位。实验室中可以人工制造出尽量接近于黑体的表面。

如果物体的吸收率 $A_\lambda = A$ 不随波长而变, 且 $A < 1$, 则称之为灰体。

1.1.2 红外辐射的基本定律

空间所有物体都通过辐射方式交换着能量, 如果没有其他方式的能量交换, 则物体热状态的变化就决定于发射与吸收辐射能量的差值。当物体的辐射能量等于吸收的外来辐射能量时, 该物体处于热平衡状态, 因而可以用一个函数温度 T 来描述它。热力学定律可以用于研究平衡辐射的吸收与发射的规律。

一般来说, 物体的辐射能量收支并不相等, 物体处于非辐射平衡状态。但是如果辐射热交换过程相当慢, 以致物体中内能的分布来得及变化均匀, 并继续处于热平衡状态, 那这时的辐射可视为具有准平衡性质。此时, 物体的温度是在变化的, 但每一给定的瞬时, 物体的状态都可以视为平衡的, 仍可用一定的温度来描述它。

地球大气中的辐射过程, 一般认为在地面以上至 60 km 的大气仍可视处于局地辐射平衡状态。地表与大气耦合面能量交换过程复杂, 一般在几微米的表层内, 处于非热平衡状态。

1.1.2.1 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是指在一定的温度下, 任何物体的辐射出射度 $F_{\lambda,T}$ 与其吸收率 $A_{\lambda,T}$ 的比值是一个普适函数 $E(\lambda, T)$ 。 $E(\lambda, T)$ 只是温度、波长的函数, 与物体的性质无关。

$$\frac{F_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = E(\lambda, T) \quad (1.8)$$

吸收率 $A_{\lambda,T}$ 越大, 其发射能力就越强。黑体的吸收率 $A_{\lambda,T} = 1$, 其发射能力最大。只要知道某一物体的吸收光谱, 其辐射光谱也就可以确定。

通常把物体的辐射出射度与相同温度下黑体的辐射出射度的比值, 称为物体的比辐射率, 它表征物体的辐射能力:

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{F_{\lambda,T}}{E(\lambda, T)} \quad (1.9)$$

可见 $\varepsilon_{\lambda,T} = A_{\lambda,T}$ ，即物体的比辐射率等于物体的吸收率。

1.1.2.2 普朗克定律

普朗克 (Planck) 定律给出了在热力学平衡状态下，黑体光谱辐射出射度在真空中的表达式为：

$$M_B(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (1.10)$$

式中， $M_B(\lambda, T)$ 为黑体的光谱辐射出射度，单位 W/m^2 ；

c_1 为第一辐射常数， $c_1 = 2\pi hc_0^2$ ，其中 h 为普朗克常数， c_0 为光速；

c_2 为第二辐射常数， $c_2 = hc_0/k_B$ ，其中 k_B 为玻尔兹曼常数。

本书用到的主要电磁学常数的取值及单位见表 1-1。

表 1-1 本书涉及到的主要电磁学物理常数值

名称	符号	数值	单位
真空中的光速	c_0	2.99792458×10^8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Planck 常数	h	6.626176×10^{-34}	$\text{J} \cdot \text{s}$
玻尔兹曼常数	k_B	1.380662×10^{-23}	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
Planck 定律第一常数	c_1	3.7418×10^{-16}	$\text{W} \cdot \text{m}^2$
Planck 定律第二常数	c_2	1.4388×10^4	$\mu\text{m} \cdot \text{K}$
黑体辐射常数	σ	5.6703×10^{-8}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$

1.1.2.3 斯蒂芬-玻尔兹曼定律

斯蒂芬-玻尔兹曼定律表明真空中黑体的辐射出射度与其绝对温度的四次方成正比，表达式为：

$$M_B = \frac{\pi^4 c_1 T^4}{15 c_2} = \sigma T^4 \quad (1.11)$$

式中， M_B 为黑体的光谱辐射出射度，单位 W/m^2 ； c_1 、 c_2 为 Planck 定律第一、第二辐射常数； σ 为黑体常数； T 为黑体温度，单位 K 。

1.1.2.4 朗伯定律

朗伯定律描述了辐射能量按方向分布的规律，漫辐射体的辐射亮度随天顶角呈余弦规律变化，表达式为：

$$L(\theta, \varphi) = I \cdot \cos\theta \quad (1.12)$$

式中， θ 和 φ 分别为观测天顶角和方位角， I 为辐射强度。

1.1.2.5 维恩位移定律

维恩位移定律描述了物体辐射的峰值波长与温度的定量关系：

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (1.13)$$

式中, $b=2897.8\ \mu\text{m}\cdot\text{K}$, 温度越高, $\lambda_{\max}$ 越小。例如, 对于 6000 K 的黑体, $\lambda_{\max}=0.483\ \mu\text{m}$; 对于 $T=300\ \text{K}$ 的黑体, $\lambda_{\max}=9.66\ \mu\text{m}$ 。

1.2 地震红外遥感机理

地震是一个复杂的地壳运动过程, 如何能够在震前对可能发震危险区做出有效预测, 是目前地震预报研究需要解决的技术难点。从古书记载, 再到近 20 年来国内外地震学家所做的大量科学研究一致认为地震前有“热征兆”, 但对地震红外异常机理的认识仍然不是十分清楚。为了探索地震前红外异常机理, 20 世纪 90 年代以来, 国内外地球物理、遥感、地震与航天界众多学者, 合作开展了地震红外机理的实验探索研究(王正哲, 2002), 目前大致有以下几种推论和说法。

1.2.1 地球放气

大量震例表明, 地球上每次大地震都会排出大量气体。徐秀登等对水汽、 CO_2 、 CH_4 等温室气体进行了试验, 认为红外辐射异常的产生是由于临震地球放气而导致的局部温室效应(徐秀登等, 1993; 1995)。这种大气的增温主要是由于临震前大气电场诱导气体激化, 对太阳辐射激发气体增温起到了催化作用。

强祖基等(1990; 1997)认为地震前孕震区构造活动加剧, 区域内岩石和地表的微破裂张开, 使得地下的 Rn 、 CO_2 、 CH_4 等气体沿微裂隙逸出地表, 产生局部温室效应, 从而导致孕震区大气增温, 并且对 CO_2 、 CH_4 等温室气体进行了试验, 结果显示混合气体在瞬变电场的作用下, 增温能够达到 $5\sim6^\circ\text{C}$, 并认为地壳突发性放气和低空静电场的异常必须同时出现才会导致低空大气红外增温异常。

综合前人的研究成果, 地球放气部位主要集中在洋脊、火山口、活动断裂、温泉出露点及震中区这些“地震敏感带”。地震前放气范围非常大, 一般来说, 与岩体破裂程度成正比, 放气时间主要集中在火山活动、构造活动、地震活动强烈的时期。此外, 短临震阶段, 震源区不同的放气地点, 放出气体的成分不同, 同一地点发生不同震级地震时, 放出的气体浓度也不同。这些逸出的大量异常气体, 与红外增温异常的关系有待进一步研究。

1.2.2 地壳应力应变

众多实验研究表明: 地壳应力应变可能是地震红外异常的产生原因之一。邓明德等(1993; 1994; 1997)认为在地震孕育过程中, 震源体及其周围介质会向外辐射电磁能, 通过实验研究不同岩性岩石在不同组合方式、不同应力加载条件下, 岩石强度、温度、发射波谱特征及其时空演化规律的变化。结果显示, 岩石应力状态的改变会引起岩石热状态改变, 当岩石内部热量积累到一定程度时, 又会影响岩石的应力状态, 使岩石的强度降低, 同时还发现岩石试件在临破裂前有温度突升, 继而保持高温恒定或小幅下降的过程, 温度突升的量级一般为 $0.5\sim3.5^\circ\text{C}$ (升温幅度和岩性及岩石结构有一定的关系), 并认为这是短临破裂温度前兆。吴立新、刘善军等(2004a, 2004b, 2004c, 2004d; 刘善军等, 2007)对非连续组合断层、断层双剪黏滑、交会断层黏滑、岩石压剪破裂的红外辐射规律开展了试验研究, 并分析了其对地震前兆的意义: 双轴加载过程中岩石表面红外辐射温度