

# 临震卫星热红外异常的机理分析

徐秀登, 徐保华, 马未宇

浙江师范大学卫星遥感研究中心, 浙江金华 321004

**[摘要]** 围绕卫星红外异常预测地震方法的理论基础——临震红外异常的成因机制问题, 简介前人基于实验的各种假说; 结合红外遥感和地面观测实际进行验证和评述; 从红外遥感理论依据——斯忒藩-玻耳兹曼定律出发加以分析, 针对临震热红外异常出现时间的短暂性、范围的区域性、增幅的显著性等特点加以具体运用, 从理论和实践的相结合上, 对红外异常的机理和红外遥感地震的方法, 进行评述和展望。

**[关键词]** 临震; 热红外异常; 成因机理; 地震遥感

**[中图分类号]** P315.72

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-7857(2007)06-0038-05

## Satellite Thermal Infrared Anomaly and Impending Earthquake

XU Xiudeng, XU Baohua, MA Weiyu

Satellite Remote-Sensing Study Center, Zhejiang Normal University, Jinhua, 321004, Zhejiang Province, China

**Abstract:** In this paper, the infrared anomaly related with impending earthquakes is analyzed as the basis for forecasting tectonic earthquakes by satellite thermal infrared anomaly. Many hypotheses based on experiments are reviewed, in the light of the infrared image analysis and ground observations. Their theoretical basis——Stefan-Boltzmann law is applied to analyze the features of infrared anomaly, including the transient features in time, the regional features in space and the amplitude variation features in temperature. The paper focuses on the method of forecasting earthquake with satellite infrared remote sensing.

**Key Words:** impending earthquake; thermal infrared abnormality; formation mechanism; earthquake remote sensing

**CLC Number:** P315.72

**Document Code:** A

**Article ID:** 1000-7857(2007)06-0038-05

临震热红外异常成因机理是卫星红外异常预测地震方法的理论基础, 是分析红外异常特征及其时空动态变化与地震活动关系的指针。自 20 世纪 90 年代以来, 先后有一批国内外学者对临震前(2~21 d)为何会出现大面积(几万~上百万 km<sup>2</sup>)、大幅度(2~10℃)的低空大气-地面增温异常, 导致卫星红外异常, 进行了岩石加载过程的红外辐射实验研究和震前地面温度与红外辐射现场观测研究, 提出了各种推论和假说。本文拟对红外遥感的理论根据——斯忒藩-玻耳兹曼定律进行分析, 对临震热红外异常机理进行深入探讨, 进而展望卫星红外遥感地震方法的可行性。

### 1 实验与假说

对于震前低空大气-地面增温异常的成因, 迄今基于实验大致有以下几种推论和假说。

1) 地下热传导<sup>[1]</sup>: 由于构造运动引起岩浆和热液

活动, 导致地下局部高温向地表传导。

2) 断层蠕动摩擦生热<sup>[2]</sup>: 由于孕震断层的蠕动, 导致断层两盘摩擦生热引起地面增温。

3) 应力致热<sup>[3-8]</sup>: 耿乃光、吴立新等的遥感-岩石力学系列实验研究证实, 完整岩石受压或压剪到破裂前, 以及既存断层黏滑失稳前的红外辐射温度场, 皆具随应力-应变发展的规律性升温现象。岩石在压剪破裂瞬间剪切面的红外辐射温度超过 73℃; 花岗岩在刻划瞬间的红外辐射温度超过 317℃。因此地壳中的既存断层和大震前岩层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。

4) 应力-耗散热效应<sup>[9]</sup>: 认为地壳应力场对岩土介质非弹性变形做功所产生的耗散热, 可能是震前地温上升的主要原因之一。由于土层远较岩石层容易产生塑性变形耗散热, 所以震前的地温异常应在土层覆盖地区表现得最为明显, 且主要集中在浅层土层内, 形成所谓

收稿日期: 2007-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40172101)

作者简介: 徐秀登, 男, 浙江师范大学, 教授, 主要从事卫星遥感短临地震研究; E-mail: xxd@zju.net

的“热罩”现象。

5) 孕震区震前黑罩效应<sup>[10]</sup>:震前孕震区内,由于应力-应变所伴随的各种物理、化学变化,犹如在孕震区地面形成黑罩,导致地面对太阳辐射能的吸收量和地-气能量交换状态改变,使地面升温,向下传导而使 0.8~3.2 m 地温升高。

6) 微震声波振动促使土壤热通量变化<sup>[11]</sup>:实验提出地表土壤水分含量的变化是震前遥感热现象异常的主要机制之一。在主破裂发生前,已有大量微震产生的不同频率的声波传至地表。实验显示,这种声波能量作用于地表土壤中,能改变土壤含水量,从而改变地表的潜热通量和由土壤性质控制的土壤热通量,破坏了地表原有的热量平衡系统,在同等周日辐射能量条件下,使地表温度产生变化。

7) 地球放气温室效应<sup>[12-15]</sup>:最早提出此观点的是前苏联学者 Горный<sup>[9]</sup>,他认为热红外异常可能与断裂近地面处大气层的气体混合物成分的改变及其凝聚有关。大气气体成分的改变会产生不同的效应,其中之一是引起温室效应。在 2 000 m 的大气层内,CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>气体含量的增多将导致地面温度提高几度。在地震活动区大气层内,地震活动可导致温室气体含量增加 1~2 个数量级。徐秀登、强祖基等实验表明,温室效应作用可升高 1.0~3℃<sup>[14,16]</sup>。

8) 高频电场激发大气红外辐射<sup>[16]</sup>:在岩石变形—破裂过程中,水不断地运动,在应力作用下尤其是当微裂隙大量发生时,带正电的运动着的水可以产生较大的过滤电位,所产生的强电场使空气电离并被激发,从地下逸出的不同气体,在低空电场的作用下发出各种波长的光子,形成人们在地震前所看到的各种地光和一些人们肉眼看不见的红外光。

9) 应力激活岩石空穴电荷红外辐射<sup>[17]</sup>:美国宇航研究中心 Freund 等学者实验表明,花岗岩等含有 P 空穴的岩石试件,在高压下变形后,部分带正电的 P 空穴会被激活,向岩石表面扩展迁移,到岩石表面后与负电荷复合的同时,以中红外辐射(8~8.5 μm)方式释放能量。

10) 低空大气准静电场异常“促进”气体增温效应<sup>[18]</sup>:在实验的基础上,提出震前普遍出现的临震大气准静电场异常对大气的极化作用,是促进大气增温异常的主要因素。

## 2 实际验证与评述

上述实验是在实验室自设条件下得出的认识和结果,应与自然界实际条件和震前实测的红外增温异常加以对照、验证,有些与实际有出入。

文献[16]的高频电场激发气体红外辐射实验,设置了超过 80 000 V/m 的瞬变电场激发试管内大气或温室

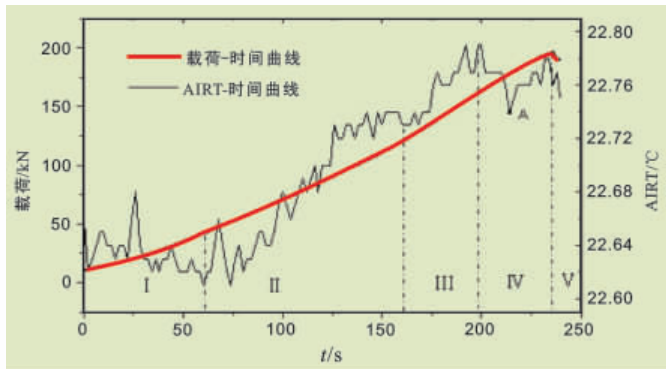
气体,自然能使气体产生包括红外辐射在内的电磁辐射,导致管内气体高达若干摄氏度的增温。但孕震区短临地震前是否有这样高的电场强度,是否有高频瞬变电场?文章中没有交待,而据郝建国等 20 多年的实际观测,震前 2~40 d 内测得的多是 300~700 V/m 的超低频准直流低空大气负电场异常<sup>[19]</sup>。

又例如文献[11],大震前微震产生的声波振动作用引起土壤含水量从湿到干变化,改变地表潜热通量和土壤热通量,致使地面温度先降后升的实验,也与实测临震红外增温异常一般存在的震前先增温后衰减再发震的规律不符。

上述实验假说中,与短临红外增温异常特征、规律吻合得最好的是下面两种实验假说。

### 1) 应力致热说

根据邓明德、吴立新等系列实验,所获得的受压试件的 AIRT(岩石表面遥感红外辐射平均温度)异常的基本特征(异常的应力相关性、异常受破裂制约性、异常位置的迁移性、异常演变的阶段性)与地震短临期间卫星红外与地面增温异常的四大基本特征(异常的非日照控制性、异常的活动构造制约性,异常位置迁移性与异常演变的阶段性)如出一辙。特别是 60%~70%的  $M_s \geq 5.5$  地震具有的震前红外增温异常的初始增温—增温高峰—增温衰减—发震—增后平静的阶段性演变,正是受压岩石的塑性变形—应力闭锁—应力解锁—破裂失稳—应变能释放应力松弛过程的“客观反映”。如图 1 所示。



I—加载开始 II—线弹性 III—应力闭锁 IV—解闭锁 V—破裂

A 点为高峰增温后的短暂降温——岩石破裂前兆

图 1 岩石试件载荷和 AIRT 曲线对照图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Contrast of Load and AIRT curves for rock samples

### 2) 低空大气准静电场异常极化气体增温效应说

据郝建国等长期观测<sup>[19]</sup>,几乎所有  $\Delta \leq 100$  km,  $ML \geq 4.0$  和  $\Delta \leq 250$  km,  $ML \geq 5.0$ , 地震前 2~40 d 内皆可监测到大幅度(约 300~700 V/m)的准静电负异常,异常范围可达  $3 \times 10^4 \sim 51 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,与临震大气增温异常在时空上基本对应。笔者用了 3 年时间,在不同季节和气候条件下,开展了在同一条件下不同气体在有电场和无

电场作用时的升温对比模拟试验。结果表明:低空大气电场对非极性分子气体  $N_2, O_2, CO_2, CH_4$  等增温效应的“促进”作用相当可观。在模拟现场的  $E=700 \text{ V/m}$  或  $350 \text{ V/m}$  直流电场作用下,大气温度升高  $2.0\sim 4.4^\circ\text{C}$ ,  $N_2$  温度升高  $2.6\sim 6.6^\circ\text{C}$ ,  $CO_2$  温度升高  $1.9\sim 4.9^\circ\text{C}$ , 与  $M_s$  为  $5\sim 6$  地震前的红外辐射增温幅度相当<sup>[14]</sup>。

上述基于实验的多种红外成因机理都不同程度地对震前增温有贡献,但各机理的内在关系有的是并行关系,多数是派生关系,实由构造应力引起的 1 次、2 次甚至 3 次、4 次效应,如图 2 所示。

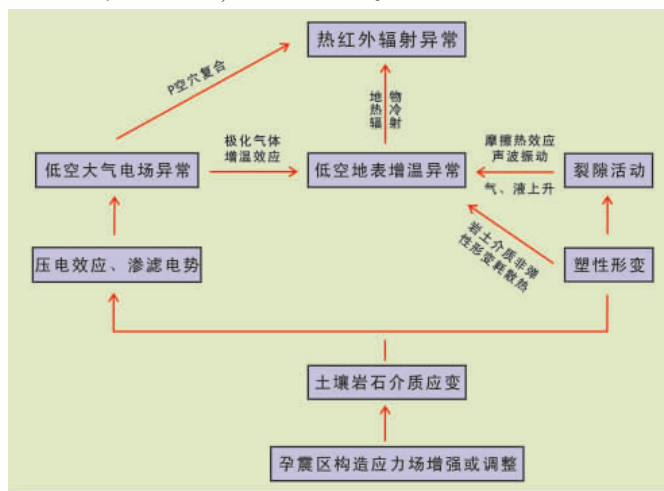


图 2 临震热红外辐射异常成因机理关系示意图

Fig. 2 Relation-map of abnormal infrared radiation related with impending earthquake

### 3 理论分析

热红外遥感地震的基本思路是:监测地震构造活动引起的地表(包括土壤、岩石、植被和水体表面)增温及其产生的热红外辐射异常,研究其时空规律与地震活动的关系,以期实现地震预测的目标。

地物热红外辐射遵循斯忒藩-玻耳兹曼定律:

$$\omega_{\lambda} = \varepsilon \sigma T_k^4$$

式中,  $\omega_{\lambda}$  为地物红外波段辐射通量密度;  $\varepsilon$  为地物比辐射率,是物质辐射能力的量度;  $T_k$  为地表的实测绝对温度;  $\sigma$  为玻耳兹曼常数。

卫星热红外遥感系统大多记录的是地面的辐射温度  $T_k$ , 可根据通量公式换算得出

$$T_r = \varepsilon^{1/4} T_k$$

根据上述公式可得出几点认识: ① 红外辐射通量  $\omega_{\lambda}$  或辐射温度  $T_r$  是地物比辐射率  $\varepsilon$  和地表绝对温度  $T_k$  的函数, 只要测知地表温度  $T_r$  和所在地物  $\varepsilon$  就可确定地表热辐射强度  $\omega$  或辐射温度  $T_r$ ; ② 只要地表绝对温度  $T_k > 0 \text{ K}$ , 就会有热红外辐射产生, 卫星红外波段就能接收到; ③ 地物微小的温度差异 ( $\Delta T_k$ ) 会引起红外辐射通量的明显变化。即震前微小的地面增温, 经过地气耦

合放大作用就会产生  $\varepsilon \sigma \Delta T^4$  的热辐射通量  $\omega$  的明显热效应。

据各种震前红外增温机理假说, 孕震区由于构造活动加剧致使红外增温的途径多样。但归结于玻耳兹曼定律就是两大因素, 一个是使  $T_k$  增加, 另一个是使  $\varepsilon$  变化(如应力耗散热机制、震前黑罩效应说), 还有的使  $\varepsilon$  和  $T_k$  同时变化(如微震声波促使土壤含水量变化说)。这样, 问题就归结到能否测定和如何确定此复杂多变的  $\varepsilon$  和  $T_k$ 。这已成为卫星红外遥感能否用于感知地震前兆信息和监测地震活动的关键。

#### 1) 地表温度

地表温度  $T_k$  不是地物的辐射温度, 而是地表与低空大气热量平衡的产物<sup>[17]</sup>。它取决于热量平衡中 5 个分量

$$R_n = H + LE + F + P + \Delta R_n$$

式中, 净辐射  $R_n$  为地表各种入射和出射辐射的矢量总和, 也称辐射平衡;  $H$  为显热通量, 由大气湍流引起;  $LE$  为潜热通量, 由地表水分蒸发、蒸腾引起;  $F$  为土壤热通量, 由土壤性质和状态控制;  $P$  为植物消耗量, 是植物光合作用的需要;  $\Delta R_n$  为地震构造活动引起的异常增量。

上述热辐射通量用温度计测量并表示为

$$T_k = T_H + T_{LE} + T_F + T_P + \Delta T$$

从该热量平衡方程得知, 某时刻某地的  $T_k$  是那一时刻诸因素热量平衡的结果, 是 5 个分量的和。每一分量的变化均可造成地表温度的变化而且随时随地都可能变化。所以, 要通过测知各分量获得具有时间和空间代表性的真实地表温度是非常困难的<sup>[17]</sup>。

但我们的目的是提取地震孕震区在临震时段地震构造加剧活动衍生的地表增温  $\Delta T$ 。故将  $T_k$  按成因分为非震(以气象为代表可用  $T_m$  表示)和地震(用  $T_q$  表示)两大类; 按时间分为短临震前正常时段地表温度 ( $T_0$ ) 和短临期异常时段增加温度 ( $\Delta T$ )。上式可简化为

$$T_k = T_0 + \Delta T$$

其中,  $T_0$  为地震增温异常出现前一日各量之和,  $T_0 = T_{H0} + T_{LE0} + T_{F0} + T_{P0}$ ;  $\Delta T$  为异常出现后某测定时刻的增温值, 包括气象和地震两方面增温之代数和;  $\Delta T = \Delta T_m + \Delta T_q$  ( $\Delta T_m$  为气象增温,  $\Delta T_q$  为地震构造活动增温)。于是地震异常出现后的斯忒藩-玻耳兹曼定律可表述为

$$\omega = \sigma \varepsilon (T_0 + \Delta T)^4$$

#### 2) 比辐射率

比辐射率  $\varepsilon$  反映物体的辐射能力, 也是吸收能力的量度, 且是反射能力的反映。因为对于地表这样的不透明物体来说,  $\rho + \alpha + \tau = 1$  ( $\rho$  为反射率,  $\alpha$  为吸收率,  $\tau$  为透射率) 中  $\tau = 0$ , 所以  $\rho + \alpha = 1$ 。

吸收率与发射率是相等的, 有  $\alpha = \varepsilon = 1 - \rho$ 。

比辐射率  $\varepsilon$  是指地面的辐射出射度(即地面单位面积发出的辐射通量)  $\omega$  与同温度的黑体的辐射出射度

的比值。即  $\varepsilon = \omega / \omega_{\text{黑}}$ 。黑体的辐射率为 1, 实际地物的辐射率为  $0 < \varepsilon < 1$ 。它对辐射通量密度  $\omega$  和辐射温度  $T_r$  的影响是相当大的。实验表明, 同一分子运动温度为 283 K 的铝块, 抛光的一半表面反射率 ( $\rho$ ) 高, 故发射率低,  $\varepsilon = 1 - \rho = 0.06$ ; 涂成黑色的表面  $\alpha$  大, 即  $\varepsilon$  大, 达 0.97, 结果为

$$T_{r\text{黑}} = 0.97^{1/4} \times 283 \text{ K} = 281 \text{ K}$$

$$T_{r\text{光}} = 0.06^{1/4} \times 283 \text{ K} = 140 \text{ K}$$

两者辐射温度差 141℃。因此, 如果不考虑地表比辐射率和环境辐照度, 简单地把辐射温度视为地表真实温度计算地表辐射通量的话, 其误差将是惊人的, 甚至对地表通量的方向也可能作出相反的判断<sup>[20]</sup>。

但影响地物比辐射率的因素很多, 随下垫面地质地貌、地物类型、地表粗糙度、颜色、表层含水量、植被覆盖度等的不同而不同, 很难计算, 更难测定, 并且热红外遥感的空间分辨率低 (常用的静止卫星星下点像元为 5 km) 必然造成不同特征下垫面复合的混合像元, 则更是难上加难。

正因为比辐射率的多元性、多变性造成的不确定性, 导致红外遥感地面温度的混沌莫测性, 从而使许多遥感专家对卫星热红外遥感地震前兆信息及其动态规律的可行性提出质疑。事实上, 一般突发性震兆异常出现于震前 4~10 d, 最长 21 d; 空间上是区域性的, 异常面积可达几万甚至上百万 km<sup>2</sup>。因此, 常用的方法有二: 一是采用同一地段不同时段的不同温度对比, 而不是用地面绝对温度; 二是采用同一地区同一时刻不同日期的温度差值法。这么短暂的时间内被监测地区的  $\varepsilon$  一般是基本不变的。因此可把玻耳兹曼公式中的  $\varepsilon$  作为常数, 用异常温度场  $\omega_A$  与正常温度场  $\omega_0$  相减求出  $\Delta\omega$  和  $\Delta T_r$  异常系列图, 公式为

$$\Delta\omega = \omega_A - \omega_0 = \sigma\varepsilon(T_0 + \Delta T_k)^4 - \sigma\varepsilon T_0^4 = \sigma\varepsilon[(T_0 + \Delta T_k)^4 - T_0^4]$$

经运算简化

$$\Delta\omega = 4\sigma\varepsilon T_0^3 \Delta T_k \quad \Delta T_r = 4\varepsilon^{1/4} T_0^3 \Delta T_k$$

其中正常地表温度的  $T_0$  可测知, 由此从理论上建立了  $\Delta\omega$  或  $\Delta T_r$  与地面增温  $\Delta T_k$  的正相关关系。

至于地面和低空大气的红外辐射能量穿过地表-太空大气层的“长征”途中是否会被大气吸收, 能否被卫星红外扫描仪如数接收的问题, 这在红外遥感中多选用红外辐射波的大气窗口。如 GMS 选用  $\lambda = 10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$  (CH3) 和  $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$  (CH4), 大气对该波段基本不吸收, 且有一定的散射弥补了少量的衰减。因此, 卫星红外辐射仪基本上能够如数接收地面-低空大气的增温辐射, 实践也验证了这一点<sup>[21]</sup>。

#### 4 结论与展望

对短临卫星红外异常的成因机理及其相关的热红外遥感地震方法的可行性问题, 通过诸多实验研究、红

外遥感资料的实际验证和对红外遥感理论依据的斯忒藩-玻耳兹曼定律的理论分析可以得出如下认识。

1) 地震短临期间出现突发性地面增温异常是一种非常普遍的现象。因地壳随地震构造加剧活动从孕震到发震的过程中, 产生的机械应变能和其他物理、化学作用所产生的能量, 大部分都将转变成热能, 以红外辐射方式通过各种途径释放出来。

2) 引起低空大气地面增温异常的因素是多元的, 上述实验研究所得的种种成因假说大多是存在的, 但其中地应力致热说是主导因素, 其他都是由它衍生的连锁反应。

3) 对震兆红外异常的贡献大小和普遍程度有差别。据我们模拟试验和红外异常特征与规律验证分析, 临震大气静电异常对大气 (包括含地下逸出气体的异常大气) 的极化作用, 是大气在太阳辐射下产生大面积、大幅度增温异常的主要因素; 异常大气的“温室效应”也是一个重要原因。

4) 斯忒藩-玻耳兹曼定律  $\omega_A = \varepsilon\sigma T_k^4$  (或  $T_r = \varepsilon^{1/4} T_k$ ) 中的比辐射率  $\varepsilon$  和地物温度  $T_k$  是个多因、多变、目前难以测定的变量, 可采用相同地区不同日期同一时刻的异常温度场与正常温度场相减的差值法得到的  $\Delta\omega = 4\varepsilon\sigma T_0^3 \Delta T_k$  或  $\Delta T_r = 4\varepsilon^{1/4} T_0^3 \Delta T_k$ , 及临震异常十多天的短时段内地面状况和气象活动基本稳定的特定条件下 (即视  $\varepsilon$  为常量,  $\Delta T_k \approx 0$ ),  $\Delta T_r$  与  $\Delta T_k$  的正相关性, 并据  $\Delta T_k = \Delta T_m + \Delta T_q$ , 用  $\Delta T_r$  系列图像来监测  $\Delta T_q$  的时空动态, 实现用卫星红外遥感资料揭示地震构造活动时空动态的目的。从笔者 18 年来用此方法进行的事前预测和震后总结统计, 60%~70% 的  $M_s \geq 5.5$  的地震可有明显的红外异常及其清晰的动态规律。

5) 要使红外遥感成为地震短临预测的准确的手段, 需待地震、气象、遥感等部门联合攻关, 解决比辐射率  $\varepsilon$  的较准确测定和短时气象变化  $\Delta T_m$  的准确预测。

#### 参考文献 (References)

- [1] 兰州地震大队气象地震组. 气象与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1976: 55-65.  
The Group of Meteorology and Earthquake of Lanzhou Earthquake Department. Meteorology and earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1976: 55-65.
- [2] 蔡永恩, 等. 地震前断层蠕动与地温异常的探讨[J]. 地震学报, 1987, 10(2): 165-174.  
CAI Yongen, et al. A study on preseismic fault creep and ground temperature anomaly [J]. Acta Seismologica Sinica, 1987, 10(2): 165-174.
- [3] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德, 等. 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): 645-652.

- GENG Naiguang, CUI Chengyu, DENG Mingde, *et al.* Remote sensing observation in fracture experiment of rocks and opening of rock mechanics of remote sensing [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1992, 14(Suppl): 645–652.
- [4] 刘善军, 吴立新. 岩石受力的红外辐射效应[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- LIU Shanjun, WU Lixin. Infrared radiation effect of loaded rocks[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [5] WU L X, CUI C Y, GENG N G, *et al.* Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies [J]. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2000, 37(6): 879–888.
- [6] 吴立新, 刘善军, 吴育华, 等. 遥感岩石力学(I): 非连续组合断层破裂的热红外辐射规律及其构造地震前兆意义[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(1): 24–30.
- WU Lixin, LIU Shanjun, WU Yuhua, *et al.* Remote sensing –rock mechanics (I): Laws of thermal infrared radiation from fracturing of discontinuous jointed faults and its meanings for tectonic earthquake omens [J]. *Chin J Rock Mech Eng*, 2004, 23(1): 24–30.
- [7] WU L X, LIU S J, WU Y H, *et al.* Precursors for rock fracturing and failure–Part I: IRR image abnormalities[J]. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2006, 43(3): 473–482.
- [8] WU L X, LIU S J, WU Y H, *et al.* Precursors for rock fracturing and failure–Part II: IRR T–Curve abnormalities [J]. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2006, 43(3): 483–493.
- [9] 王庆良, 王文萍, 梁伟锋, 等. 应力–耗散热地温前兆机理研究. *地震学报*, 1998, 20(5): 529–534.
- WANG Qinglian, WANG Wenping, LIANG Weifeng, *et al.* Stress –dissipative heat geotemperature precursor mechanism of earthquakes [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1998, 20(5): 529–534.
- [10] 张治洮. 地震预测的新方法——简易黑罩法简介[J]. *西北地质*, 1995, 16(1): 42.
- ZHANG Zhitao. A new method for earthquake prediction –brief introduction of a sample black cover method[J]. *Northwestern Geology*, 1995, 16(1): 42.
- [11] 郭子祺. 航天遥感技术进行短临地震预报评述 [J]. *遥感信息*, 1998, 2: 13–15.
- GUO Ziqi. Comment on study of prediction of short-term and impending earthquake by remote sensing techniques[J]. *Remote Sensing Information*, 1998, 2: 13–15.
- [12] ГОРНЫЙ В И. 地球热红外辐射——地震活动性的标志[J]. *АН CCP*, 1988, 30(1): 67–69.
- ГОРНЫЙ В И. The earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity[J]. *Proceeding of Academy of Sciences of the USSR, AN CCP*, 1988, 30(1): 67–69.
- [13] 徐秀登, 强祖基, 侯常恭. 非增温背景下的热红外异常兼机制讨论[J]. *科学通报*, 1991, 36(11): 841–844.
- XU Xiudeng, QIANG Zuji, DIAN Changgong. Thermal infrared anomalies under the non-temperature-increment background and the mechanism discussion [J]. *Chin Sci Bull*, 1991, 36(11): 841–844.
- [14] 徐秀登, 徐向民, 马升灯, 等. 临震大气增温异常成因的初步认识[J]. *地震学报*, 1995, 17(1): 123–127.
- XU Xiudeng, XU Xiangmin, MA Shengdeng, *et al.* Preliminary inquiry into the causes of anomaly increase of air temperature by an impending earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1995, 17(1): 123–127.
- [15] 卢振权, 吴必豪, 等. 中国近海海域卫星热红外亮温增温异常探讨[J]. *现代地质*, 2005, 19(1): 74–81.
- LU Zhenquan, WU Bihao, *et al.* Brightness temperature anomalies in satellite –based thermal infrared remote sensing along the offshore china seas[J]. *Geoscience*, 2005, 19(1): 74–81.
- [16] 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.
- QIANG Zuji, KONG Lingchang, GUO Muanhong, *et al.* An experimental study on temperature increasing mechanism of satellitic thermo infrared [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, 19(2): 197–201.
- [17] OUZOUNOV D, FREUND F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33: 268–273.
- [18] 徐秀登, 徐向民, 马升灯, 等. 电场作用与大气增温效应的再试验[J]. *西北地震学报*, 1997, 19(1): 27–31.
- XU Xiudeng, XU Xiangmin, MA Shengdeng, *et al.* Reexperiment on the action of the electric field and the effect of the air temperature increase [J]. *Northwestern Seismological J*, 1997, 19(1): 27–31.
- [19] 郝建国, 唐天明, 李德瑞. 大气电场异常作为地震前兆信息效能的统计评估[J]. *中国地震*, 1998, 14(2): 167–172.
- HAO Jianguo, TANG Tianming, LI Derui. Evaluating the statistical validity regard static electric field anomalies as earthquake precursors [J]. *Earthquake Research in China*, 1998, 14(2): 167–172.
- [20] 张仁华. 对于定量热红外遥感的一些思考 [J]. *国土资源遥感*, 1999, 1: 1–5.
- ZHANG Renhua. Some thinking on quantiative thermal infrared remote sensing[J]. *Remote Sens Land Res*, 1999, 1: 1–5.
- [21] 徐秀登, 强祖基, 侯常恭, 等. 临震热红外异常与地面增温异常[J]. *科学通报*, 1991, 36(4): 219–294.
- XU Xiudeng, QIANG Zuji, DIAN Changgong, *et al.* Impending –earthquake satellite thermal infrared and ground temperature increase anomalies[J]. *Chin Sci Bull*, 1991, 36(4): 219–294.

(责任编辑 岳臣)