

地表热红外辐射与钻孔应变的关系探索^{*}

陈顺云^{1**} 马 瑾¹ 刘培洵¹ 刘力强¹ 蒋靖祥²

1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

2. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

摘要 热红外辐射与构造变形之间的关系属于热红外遥感在地震研究中深入应用的一个重要环节, 目前研究还不够充分. 针对这一问题, 文中根据新疆 10 余年钻孔应变和热红外遥感资料, 结合理论分析, 对地表热红外辐射与钻孔应变之间的关系进行了初步探索, 获得了 3 方面认识: (1) 根据实测资料, 从变化趋势看, 应变变化时, 热红外辐射也随之变化. 应变变化幅度大, 热红外辐射变化也强. (2) 张量分解可作分析三维情况下应变与温度(热辐射)间变化关系的一条新思路. 一般情况, 应变分为体积变化和形状变化. 两种情况下, 热红外辐射与应变的关系各有不同. 实测资料显示: 以体积变形为主时, NS 和 EW 两方向的应变与热辐射的变化趋势均呈现出明显的一致性; 以形状改变为主时, 应变与热红外辐射在一方向上的变化趋势一致, 另一方向则相反. (3) 找到了体应变与温度变化之间的理论关系. 弹性变形情况下, 体应变变化($\Delta\theta$)与温度变化(ΔT)之间存在明确的线性关系: $\Delta T = aT\Delta\theta$, 其中 a 为常数, T 为初始温度. 换言之, 热红外辐射的变化与体应变的变化成正比, 这与实际结果相符. 总之, 分析表明热红外辐射与地应变间存在密切关系, 结果可为利用卫星热红外遥感信息探测现今构造活动提供一定的理论及野外基础.

关键词 热红外辐射 应变张量 钻孔应变 温度

卫星热红外信息在地震预测研究的应用受到越来越多的重视, 目前已开展了许多探索性研究. 然而, 热红外遥感信息在地震研究中的应用并未取得实质性进展. 客观上, 地震只是构造变形的一种表现形式, 并非所有的构造变形都会引起地震. 在此背景下, 将目标从利用热红外辐射研究地震预报转为研究构造活动, 其物理思路更加清晰. 研究表明对于探索区域断层活动以及相互作用的动态演化过程, 卫星热红外遥感信息具有独特的潜力^[1, 2].

利用卫星热红外信息探测构造活动同样面临着许多问题, 其中构造变形与热辐射之间的关系是基

本问题之一. 弄清地形变与地表热辐射之间的关系, 可为卫星热红外遥感信息与构造活动或地震活动之间提供必要的物理纽带. 研究已证实热辐射与应力应变场密切相关^[3, 4], 尚未涉及与野外地形变观测结果进行对比分析, 温度(热红外辐射)与应变之间的理论规律也不甚清楚.

地形变包括地倾斜、跨断层测量、地伸缩、定点 GPS、定点水准和钻孔应变等多种情况, 本文根据连续记录时间较久的新疆台钻孔应变测量结果, 结合热力学原理和弹性应变理论, 对地表热红外辐射与钻孔应变之间的关系进行初步探讨.

2007-06-21 收稿, 2007-09-03 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40572125, 90202018)、科技部科研院所社会公益研究专项资金(批准号: 2004DIB3J1290)和中国地震局地质研究所基本科研业务专项(编号: DF-IGCEA-0607-1-5)共同资助

^{**} E-mail: chshunyun@yahoo.com.cn

1 钻孔应变与热红外资料

1.1 钻孔应变

钻孔应变测量目标是与时间过程有关的构造应变场在测点处的变化。钻孔应变测量探头置于地表以下几十至一百多米深处的钻孔中, 所受干扰远小于地表、浅部山洞、坑道内仪器墩上安装传感器的情况, 也较少受到地壳岩层风化裂隙、地表太阳辐射热、城市建设、工程建设、人为活动等干扰因素的影响, 是测量地壳应变状态的一条重要途径, 已有近十多年历史, 应用较广^[5-17]。

钻孔应变测量一般采用 RZB-1 型分量式钻孔应变仪^[5], 其测量原理如图 1 所示。该应变仪电容传感元件采用三电极形式, 当传感器轴方向受到张力或压力作用时, 点至点之间的长度会发生变化, 具体体现为电容极板间距 d_1 和 d_2 发生变化。通过电容电桥测得电容值, 可建立电学量与轴向形变量间的关系。RZB-1 型电容式钻孔应变测量系统具有灵敏度高、稳定性好、结构简单和使用灵活等优点, 能记录到 100—200 m 深钻孔内 4 个不同方向的径向位移。

在钻孔应变观测台中, 新疆库尔勒和水磨沟两应变观测台的测量时间较长^[6-8], 有利于分析地应变与热红外辐射之间的关系。库尔勒应变观测台经纬度为 86.19°E , 41.81°N , 孔深 104.59 m, 台区附近有铁门关深大断裂通过, 断裂走向北西西, 台基岩石为前震旦系花岗片麻岩, 岩性坚硬、完整, 是测量相对应应变场的良好场所。1992 年 1 月 1 日正式观测, 数据采样间隔 1 min。水磨沟台经纬度为 87.7°E , 43.82°N , 孔深 107.4 m, 台区断裂早 NE

向展布, 该断裂属于博格达反射弧的西翼, 台基岩石为三迭系钙质砂岩, 岩石完整。建于 1990 年年底。1991 年试测, 1992 年正式观测, 采样间隔为 1 min。两测点目前均有十多年的数据积累, 可用来分析热红外辐射与地应变之间的关系。

对比分析之前, 对钻孔应变资料进行如下处理: (i) 根据现有数据的时间长度, 考虑到长周期(周期 $> 5\text{a}$) 的趋势性变化并不利于温度的积累, 采用平滑方法去除单调上升或下降的趋势性变化, 即所谓的展平处理(图 2(a), (b)和图 3(a), (b)); (ii) 考虑到热红外数据的高频信息与构造活动之间的关系尚不明确, 为了降低分析的难度, 对去除了趋势性变化的钻孔应变数据, 再次进行平滑处理, 去掉高频成分(图 2(c), (d)和图 3(c), (d)). 然后, 根据平滑后的结果与热红外辐射数据 (T_{LOW}) 进行对比分析。

1.2 地表热红外辐射

影像数据采用美国 NOAA/AVHRR Pathfinder 旬合成陆地数据集, 空间分辨率为 8 km, 时间从 1981 年 7 月—2001 年 9 月约 20 年, 其中 1994 年 9—12 月共 4 个月缺数据。数据产品的合成方法是 NDVI(normalized difference vegetation index)最大值合成法。这种数据合成方法能有效地去除云, 从而提供了近似于晴空、无云的大气条件。由于空间及时间分辨率均较低, 这些数据较适合分析大区域构造及长周期特征。

在本文工作之前已对卫星影像进行了两个方面的处理:

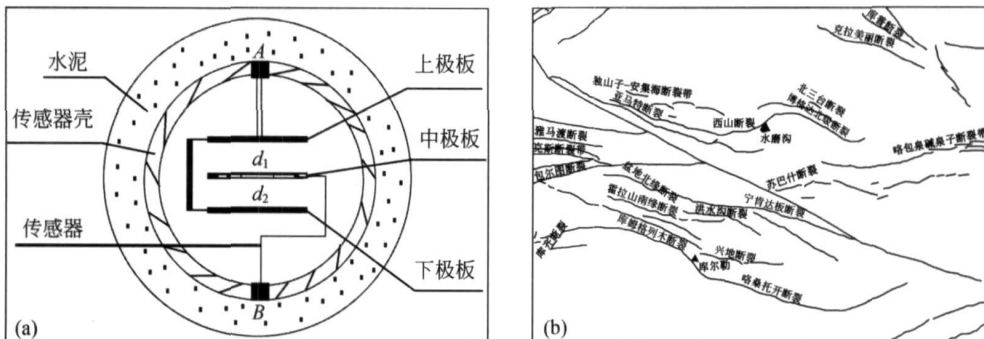


图 1 钻孔应变测量原理及台站位置

(a) RZB-1 型电容位移传感器的测量原理^[5]; (b) 库尔勒和水磨沟钻孔应变台站附近构造分布

(1) 固体地球与星载传感器之间存在大气层, 地表热红外辐射穿过大气层时受到了大气的影 响, 同时大气本身也参与热红外辐射. 利用热红外遥 感信息首先遇到的第一个问题就是如何去除这种 干扰. 然而, 精确地获得地表温度和比辐射率是 一项复杂而又极富挑战性的工作^[18-36]. 从地震研 究需要看, 更关心构造活动或地震活动所引起的 热红外辐射变化, 而非具体的温度和比辐射率的 变化. 温度和比辐射率可以合起来考虑, 只需要 对热红外遥感影像进行大气校正, 以获取真正的 地表热红外辐射即可满足需要. 本文运用分离窗 法^[18-21]校正了大气对地表热红外辐射传播过程的 影响, 获取了反映地表热红外辐射的地表亮度温 度^[37].

(2) 地表热红外辐射的影响因素较多, 不仅受 到构造活动的影响, 还受到大气、太阳以及植被等 多种非构造因素的干扰, 并非所有地表红外异常都 与构造活动或地震有关. 首先是气象因素. 天气变 化周期一般是几天或几周内, 表现为高频成分. 另 外, 影像拼接引起的变化也属于高频成分. 其次是 气候、植被等因素的影响. 植被生长、气候变化跟 地球公转密切相关, 其周期并不严格等于一年, 属 于以年变为主频的中频变化. 最后一部分为低频成 分. 包含有地球与大气长周期辐射变化. 断层活动 极其缓慢, 其引起的变化更可能属于长周期变化. 当然, 这 3 种频段成分的影响因素并不唯一, 特定 频段各种影响往往相互重叠. 不过, 在某一具体频 段应是某一类因素占主导地位, 根据实际研究需 要, 从特定频段信号中寻找所希望的地球物理信 息, 难度可能会得到降低. 文中采用小波分析, 在不 (或者几乎不) 损失原信息的基础上, 把信号 分解为互不影响的 3 个频率成分: T_{HIGH} , T_{MID} 和 T_{LOW} , 它们的周期分别为 0.0556—0.44, 0.44— 1.78 以及 1.78—10a. 每一个部分都有不同的主 导因素, 物理意义较为清楚^[38]. 目前的分析显示 T_{LOW} 可为断层或地震活动提供一定的指示信 息^[1, 38].

考虑到卫星影像的处理与分析并非本文的重

点, 略去了细节描述, 具体可参阅文献 [1, 37— 38]. T_{LOW} 也称作年变残差低频分量.

2 对比分析

2.1 库尔勒台

图 2 分别给出库尔勒台南北(NS)分量、东西 (EW)分量以及体应变值与热红外辐射之间的变化 关系. 从图 2 中可以看出, 无论是哪一分量, 存在 一个共同的特征: 应变值变化大时, T_{LOW} 变化也 大.

具体到某一分量, 则各有特点: (i) 对于 NS 方 向, 从图 2(e)可以看出, 在 1997 年前, T_{LOW} 与 NS 分量应变之间存在一定相位差, 在 1997 年左右两 者变化趋势明显一致, 之后局部趋势变化相反. 总 体上, NS 分量应变与 T_{LOW} 两者变化趋势基本一致. (ii) 对于 EW 方向, 应变值与 T_{LOW} 两者数据趋势变 化则基本相反, 其中 1992—1996 年间, 如果不考 虑局部变化情况的话, 应变值与 T_{LOW} 之间从大趋势 而言呈现出一定的相关特征. (iii) 对于体应变而 言, 应变值与 T_{LOW} 两者变化趋势明显一致, 结果与 NS 分量类似.

2.2 水磨沟台

图 3 给出水磨沟台南北(NS)分量、东西(EW) 分量以及体应变值分别与热红外辐射之间的变化关 系. 从图 3 中可以看出, 无论是哪一分量, 同样存 在一个共同的特征: 应变值变化大时, T_{LOW} 变化也 大.

与库尔勒台情况类似, 具体到某一分量, 也是 各有特点: (i) 对于 NS 分量, 从图 3(e)可以看出, 1992—1995 年, T_{LOW} 与 NS 分量应变两者变化趋势 相反; 1995—2000 年, 变化趋势则相同; 2000— 2002 年, 变化趋势相反. (ii) 对于 EW 分量, 应变 值与 T_{LOW} 变化趋势明显相同. (iii) 对于体应变而 言, 应变与 T_{LOW} 变化之间表现出 NS 分量结果类 似. 1992—1995 年, T_{LOW} 与 NS 分量应变二者的变 化趋势正好相反; 1995—2000 年, 变化趋势相同; 2000—2002 年, 又变为相反.

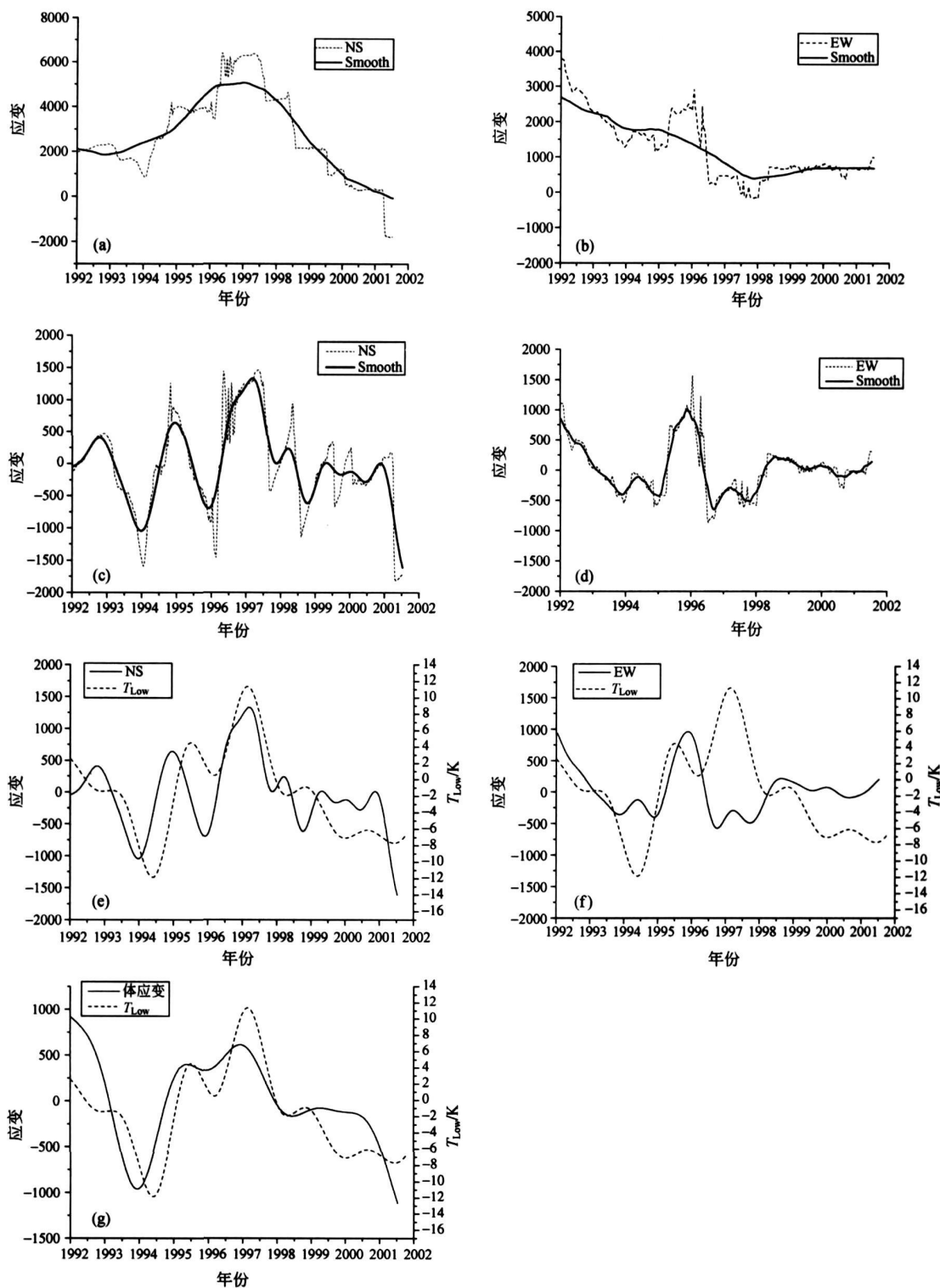


图 2 库尔勒钻孔应变与台区热红外辐射 T_{Low} 之间的关系

(a), (b) NS 和 EW 方向钻孔应变及趋势性变化; (c), (d) NS 和 EW 方向应变去除趋势性变化后结果及平滑结果; (e), (f) NS 和 EW 方向应变与 T_{Low} 之间的变化关系; (g) 体应变与 T_{Low} 之间的变化关系. 应变单位: 10^{-8}

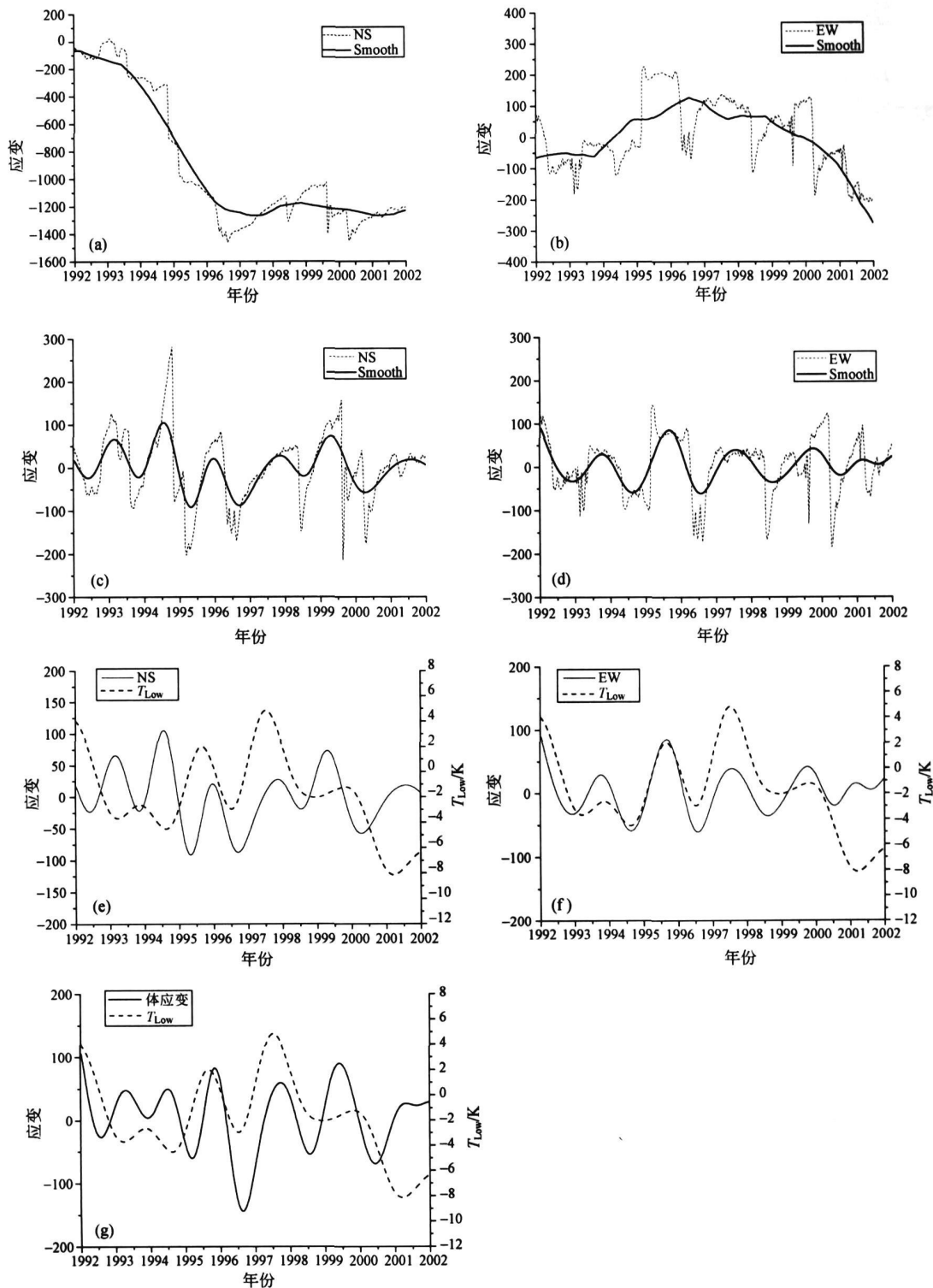


图 3 水磨沟钻孔应变与台区热红外辐射 T_{Low} 之间的关系

(a), (b) NS 和 EW 方向钻孔应变及趋势性变化; (c), (d) NS 和 EW 方向应变去除趋势性变化后结果及平滑结果; (e), (f) NS 和 EW 方向应变与 T_{Low} 之间的变化关系; (g) 体应变与 T_{Low} 之间的变化关系. 应变单位: 10^{-8}

3 理论探索

3.1 应变与温度变化的理论关系

对于三维弹性系统, 应变为张量, 可用 6 个独立分量 $\epsilon_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 来表征, 经绝热可逆过程到终态 $(T+\Delta T, \epsilon_i+\Delta\epsilon_i)$, 根据热力学原理³⁹, 有:

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{\epsilon} dT + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial S}{\partial \epsilon_i} \right)_{T, \epsilon_j (j \neq i)} d\epsilon_i = \quad (1)$$

$$\frac{C_{\epsilon}}{T} dT + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial S}{\partial \epsilon_i} \right)_{T, \epsilon_j (j \neq i)} d\epsilon_i \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial \epsilon_i} \right)_{T, \epsilon_j (j \neq i)} = -V_0 \left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial T} \right)_{\epsilon} = -V_0 \beta_i \quad (3)$$

因为,

$$TdS = C_{\epsilon} dT - V_0 T \sum_{i=1}^6 \beta_i d\epsilon_i = 0 \quad (4)$$

所以:

$$\Delta T = \frac{TV_0}{C_{\epsilon}} \sum_{i=1}^6 \beta_i \Delta \epsilon_i \quad (5)$$

其中 S 为系统的熵, $\beta_i = \left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial T} \right)_{\epsilon}$ 为热应力系数, V_0 为系统的体积, C_{ϵ} 为常应变状态下的热容量.

总之, 对于三维情况, 应变属于张量, 从(5)式可以看出系统温度变化与应变张量的所有分量之增量均有关, 难以简单的分析某一应变分量与温度变化之间的关系.

3.2 应变张量分解及与热红外辐射(温度)变化之间的关系

通常情况下, 应变张量可分解为球张量和偏斜张量之和⁴⁰:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{11} - \epsilon_0 & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} - \epsilon_0 & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} - \epsilon_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中

$$\epsilon_0 = \frac{1}{3}\theta = \frac{1}{3}(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \quad (7)$$

其中 θ 为体应变. (7)式中等式右侧第一个张量是应变张量球张量, 第二个张量为应变偏(斜张)量.

应变张量球张量反映的是一点的体积变化; 应变偏斜张量的第一不变量为零, 即应变偏量不包含体积变化, 它反映的是一点领域内的形状变形.

对于钻孔应变, 只考虑水平面上的应变变化, 属于二维应变分析. 此时

$$\epsilon_{13} = \epsilon_{23} = \epsilon_{31} = \epsilon_{32} = \epsilon_{33} = 0 \quad (8)$$

在二维情况下, 应变张量可分解为一个球张量和一个纯剪应变之和. 考虑两种极端的情况:

(i) 如果应变张量只存在球张量部分, 则此物体的形状不发生改变, 只是按比例膨胀或收缩, 此时 NS 和 EW 方向的应变变化趋势相同. (ii) 如果应变张量只存在偏应变时, 则其体积保持不变, 而只发生形状的变化, 此时 NS 和 EW 方向的应变变化趋势相反. 可以根据 NS 和 EW 两方向的应变变化趋势来判断测点的应变状态.

为了分析测点的地应变状态, 以便进一步分析其与热红外辐射变化之间的关系, 图 4 给出了库尔勒台和水磨沟台两台站 NS 和 EW 方向的应变关系.

从图 4(a)可以看出, 库尔勒台在 1994 年前后, NS 和 EW 两方向应变变化趋势一致(同时增或减), 说明该段时间里, 该测点主要以体积变形为主. 其余时间段, 从变化趋势而言, 两方向的应变变化趋势正好相反(一增一减), 即某一方向上之应变上升, 则另一方向下降, 说明主要以形状改变为主. 相应的, 1994 年前后, 热红外辐射与应变变化之间, NS 和 EW 两方向二者变化趋势均一致, 局部存在反向变化(EW 方向). 其余时间里, NS 方向应变与 T_{Low} 变化趋势一致, EW 方向则正好相反.

从图 4(b)可以看出, 水磨沟台 1996 年之前, NS 和 EW 方向的应变变化趋势一致, 该点以形状改变为主. 1996 年之后, NS 和 EW 方向的应变值变化趋势正好相反, 即以体积变形为主. 2001 年前

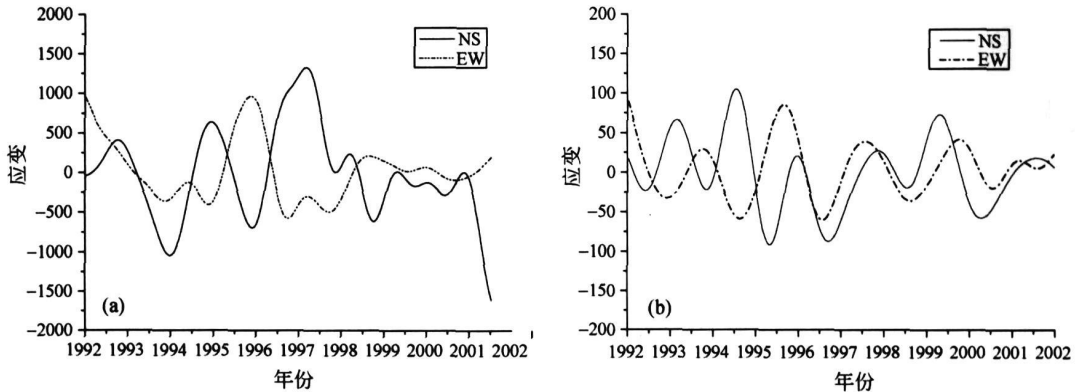


图 4 NS 和 EW 两方向钻孔应变随时间变化关系

(a) 库尔勒台; (b) 水磨沟台

后, 局部变化表现出微弱的反向特征. 相应的, 1996 年之前, 热红外辐射与应变变化之间, NS 和 EW 方向上的变化趋势相反, 即 EW 方向应变与 T_{Low} 二者变化趋势相同, 而 NS 方向二者趋势变化相反. 1996 年之后, NS 和 EW 方向应变与热红外辐射之间变化关系均表现出良好的一致性: 1996—2000 年间, NS 和 EW 方向上, 二者的变化趋势均一致; 2000—2002 年, NS 和 EW 方向上, 两者的变化趋势均相反, 这种同时转变的原因有待探索.

综上, 可以得出两点基本认识: (i) 当 NS 和 EW 两分量应变同向变化时, 即测点以体积变形为主时, 两方向的应变分量与热红外辐射之间的变化趋势表现出良好的一致性. (ii) 当 NS 和 EW 两分量应变值一个数据增大而另一个减少变化时, 即测点以形状改变为主时, 应变与热红外辐射变化之间变化趋势, 一个相同, 另一个则正好相反.

更一般的情形应属于这两种状态的迭加, 在不知受力状态等其他条件的情况下, 分析起来会更加困难.

3.3 体应变与热辐射变化关系

根据(5)和(6)式, 可以得出体应变与温度变化之间的关系:

$$\Delta T = \frac{(\beta_{11} + \beta_{22} + \beta_{33}) T}{c\epsilon} \Delta \epsilon_0 = aT\Delta\theta \quad (9)$$

其中 $a = \frac{(\beta_{11} + \beta_{22} + \beta_{33})}{3c\epsilon}$, $c\epsilon = C\epsilon/V_0$.

对于给定的物体, a 为常数. 这也就是说, 温度变化与体应变变化成正比. 换言之, 从理论上而言, 热红外辐射的变化与体应变的变化成正比.

从图 2(g)可以看出, 对于库尔勒台, 体应变值与 T_{Low} 变化之间表现出明显的正相关特征. 对于水磨沟台, 如图 3(g)所示, 体应变与热红外辐射之间的关系显得要比库尔勒台复杂, 1995—2000 年, T_{Low} 与体应变之间表现为正相关. 1992—1995, 2000—2002 年间, 则为负相关(即反向变化). 应该特别指出的是, 1995—2000 年间, 体应变值的变化幅度比其余时段要强一些, 且该时段内测点主要以体积变形为主, 即热红外辐射与体应变之间的变化关系则以正相关为主.

另外, 在库尔勒和水磨沟台中, 体应变与 NS 分量应变之间的相关系数分别为 0.83 和 0.82, 即两台站在体应变中都是 NS 分量占主要地位. 同时, 两台站体应变与热红外辐射之间的关系也与 NS 方向上的关系极为类似. 这间接说明两区域均是南北方向的构造应力占主导地位.

4 结论与讨论

根据新疆库尔勒和水磨沟两应变观测台的 10 余年的钻孔应变测量数据和热红外资料, 结合热力学原理和弹性应变理论, 得出以下几点认识:

(1) 根据实测资料, 从变化趋势看, 应变变化时热红外辐射也随之变化, 应变变化幅度大, 相应

的热红外辐射变化也强。

(2) 张量分解有望成为分析应变与温度(热辐射)间变化关系的一条新思路。从理论上而言,对于三维情况,应变属于张量,从(5)式可以看出系统温度变化与应变张量的所有分量之增量均有关,单从某一分量入手,难以找到应变与温度间的变化关系。可以将应变张量分解球应变及偏应变张量,其中,球张量只与体积变化有关,偏张量只与形状变化有关,然后再分析应变与温度变化之间的关系,有利于降低分析的难度。对新疆库尔勒和水磨沟两台站形变资料的分析时,结果均表明:(i)当 NS 和 EW 两分量应变变化趋势一致时,即测点以体积变形为主时,两方向的应变分量与热红外辐射之间的变化关系也呈现出一致性。(ii)当 NS 和 EW 两分量应变数据变化趋势相反时,即测点以形状改变为主时,一个方向上应变与热红外辐射两者变化趋势上呈现一致性,另一个方向上两者数据变化趋势则正好相反。说明了这一思路的有效性。不过,更一般的情形应属于这两种状态的迭加,分析起来将会更加困难。

(3) 弹性变形情况下,体应变变化(ΔT)与温度变化($\Delta\theta$)之间存在明确的线性关系: $\Delta T = aT\Delta\theta$,对于给定的物体, a 为常数。这也就是说,从理论上而言,热红外辐射的变化与体应变的变化成正比。这与本文的实测结果大致相符。

(4) 在库尔勒和水磨沟台中,体应变与 NS 分量应变之间的相关系数分别为 0.83 和 0.82,即两台站在体应变中都是 NS 分量占主要地位。同时,两台站体应变与热红外辐射之间的关系也与 NS 方向上的关系极为类似。说明两区域均是南北方向的构造应力占主导地位。

本文虽然取得了一定成果,同时也存在许多值得深入探讨的问题:

(1) 关于遥感资料的处理,集中处理两方面的问题,一是地表热红外遥感辐射穿过大气层到达卫星时所受大气的干扰,文中运用分窗算法获取的地表热红外辐射,并不等同于地表温度,而是地表温度和比辐射率的综合反映。二是针对地表热红外辐射之影响因素的分析。陆地表面红外辐射的影响因素比较复杂,且热红外辐射具有方向性,直接从地表热红外辐射中获取构造活动信息极其困难,如前文所述,特别是对于短周期信号,影响因素众多,

难以分析。为了降低难度,本文仅选取地表热红外辐射长周期变化进行分析,然而长期变化也还包含有其他因素的影响,这有待进一步验证。

(2) 文中的分析主要从变化趋势上进行考虑,尚未涉及到定量分析。如(9)式所示,体应变与温度之间的理论关系较为明确,野外实测资料也大致吻合,但没能给出相关的物理参数,只作一般理论定性讨论。本文的研究,只是这一项工作的开端,具体的定量关系,还有待进一步开展有关物理实验来确定。

(3) 文中从应变张量分解这一思路出发,找到了球张量与温度变化之间的关系((9)式),但未给出偏应变与温度之间的变化关系。偏应变的实质是剪应变,偏应变张量可以分解为 5 个纯剪应变^[40],它们与温度变化的关系如何?尚需进一步探索。

总之,分析表明热红外辐射与地形变间存在密切关系,本文结果可为利用卫星热红外遥感信息探测现今构造活动提供一定的理论及野外基础。

致谢 马胜利、扈小燕和陈国强等对本工作提供了多方面支持,中国地震局地壳应力研究所邱泽华研究员等对钻孔应变数据分析提供了帮助。

参 考 文 献

- 1 马 瑾,汪一鹏,陈顺云,等. 卫星热红外信息与断层活动关系讨论. 自然科学进展, 2005, 15(11): 77—85
- 2 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. 地震地质, 2000, 22(3): 210—215
- 3 刘培洵,刘力强,陈顺云,等. 地表岩石变形引起热红外异常的实验研究. 地震地质, 2004, 26(3): 502—511
- 4 刘培洵,马 瑾,刘力强,等. 压性雁列构造变形过程中热场演化的实验研究. 自然科学进展, 2006, 17(4): 454—459
- 5 欧阳祖熙,李秉元,贾维九,等. 一种钻井式地应力测量系统. 地壳构造与地壳应力文集(2),北京:地震出版社,1988
- 6 蒋靖祥,尹光华,哈斯高娃. 钻孔应变仪在地震前的记录及地震预测. 地震研究, 2000, 23(4): 410—417
- 7 蒋靖祥,尹光华,王在华,等. 新疆分量式钻孔应变阶变异常的统计特征及其在地震预测中的应用研究. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4072—4078
- 8 蒋靖祥,温和平,尹光华,等. 新疆黑孜断层现今活动特征研究及有关问题的讨论. 中国地震, 2001, 17(3): 246—252
- 9 李小文,王锦地,胡宝新. 先验知识在遥感反演中的应用. 中国科学, D 辑, 1998, 28(1): 67—72

- 10 柳钦火, 徐希孺, 陈家宜. 遥测地面温度与比辐射率的迭代反演方法—理论推导与数值模拟. 遥感学报, 1998, 2(1): 1—9
- 11 骆鸣津. 用引潮力进行钻孔的应变—应力的原地标定. 地壳形变与地震, 1989, 9(4): 51
- 12 骆鸣津, 顾梦林, 杨毅. 用固体潮观测资料将钻孔应变变化换算为地层的应力变化. 地壳形变与地震, 2000, 20(1): 73—78
- 13 邱泽华, 石耀霖. 观测应变阶在 地震应力触发研究中的应用. 地震学报, 2004, 26(5): 481—488
- 14 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(1): 118—121
- 15 赵淑平. 钻孔应变. 应力测量区域特征初探. 地震研究, 1992, 15(1): 283—290
- 16 周硕愚. 断层形变测量与地震预报. 地壳形变与地震, 1994, 14(4): 90—97
- 17 薄万举, 徐树心, 池顺良. 钻孔应变仪资料处理方法的研究. 中国地震, 1995, 11(4): 381—389
- 18 McMillin LM. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorption. JGR, 1975, 80(36): 5113—5117
- 19 McMillin LM, Crosby DS. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature. JGR, 1984, 89(C3): 3655—3661
- 20 McClain EP, Pichel WG, Walton CC. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. JGR, 1985, 90(C6): 11587—11601
- 21 徐希孺. 遥感物理. 北京: 科学出版社, 2005
- 22 Van de Griend AA, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. Int J Remote Sens, 1993, 14(6): 1119—1131
- 23 Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. Int J Remote Sens, 1987, 8(10): 1509—1522
- 24 Becker F, Li Z. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. Remote Sens Environ, 1990, 32: 17—33
- 25 McClain EP, Pichel WG, Walton CC. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. JGR, 1985, 90(C6): 11587—11601
- 26 Ouaidrari H, Goward SN, Czajkowski KP, et al. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: An assessment of for the AVHRR Land Pathfinder II data set. Remote Sens. Environ., 2002, 81(2002): 114—128
- 27 Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. Int J Remote Sens, 1987, 8(10): 1509—1522
- 28 Price JC. Land surface temperature measurements from the split windows channel of NOAA 7 advanced very high resolution radiometer. JGR, 1984, 89(D5): 7231—7237
- 29 Wan ZM, Li ZL. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. IEEE Transaction, Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(94): 980—996
- 30 Wan ZM, Zhang YL, Zhang QC, et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data. Remote Sensing of Environment, 2002, (83): 163—180
- 31 Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity. Remote Sens Environ, 1992, 42: 117—122
- 32 陈良富, 庄家礼, 徐希孺. 热红外遥感中通道间信息的相关性及其对陆面温度反演的影响. 科学通报, 1999, 44(19): 2122—2127
- 33 范闻捷, 徐希孺. 论热红外多角度遥感数据的相关性及视角优选配置. 中国科学, D 辑, 2003, 33(8): 809—815
- 34 高峰, 李小文, 夏宗国, 等. 基于知识的分阶段不确定性多角度遥感反演. 中国科学, D 辑, 1998, 28(4): 346—350
- 35 赵红蕊. 空间信息用定量热红外遥感反演. 北京师范大学, 博士学位论文, 2003
- 36 张仁华, 孙晓敏, 刘纪远, 等. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异. 中国科学, C 辑, 2001, 31(11): 959—965
- 37 陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 等. 中国地表亮度温度年变基准场. 地震地质, 2004, 26(3): 528—538
- 38 陈顺云, 刘培洵, 刘力强, 等. 地表热红外辐射的小波分析及其在现今构造活动研究中的意义. 地球物理学报, 2006, 49(3): 824—830
- 39 谢锐生. 热力学原理. 北京: 人民教育出版社, 1980, 139—175
- 40 尹祥础. 固体力学. 北京: 地震出版社, 1985, 179—185