

文章编号: 0253-3782(2006)01-0091-07

红河断裂热红外高温条带的成因及其与地震活动性关系的探讨^{*}

屈春燕 单新建 马瑾

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室)

摘要 针对 2003 年发生在云南大姚的两次 6 级以上地震, 利用 1999 年、2003 年和 2004 年的 NOAA 卫星资料, 对川滇地区($22^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$)的热红外影像进行了对比分析解译, 对红河断裂高温条带的亮温年变特征作了分段和分区统计分析。结果表明, 红河断裂高温条带的成因与水系和地形等地表环境因素有关, 是由下垫面热辐射差异造成的红外影像特征。但在地震年份, 高温条带内的亮温年均值明显高于非地震年份, 这说明地震年份断裂的热活动性增强, 能够引起高温年变异常。利用卫星热红外遥感资料, 通过监测不同年份之间高温条带的相对活动水平, 可以对这种地震前的断裂热活动性进行监测和异常判断。

关键词 热红外遥感 高温年变 地震征兆 断裂活动

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

引言

卫星热红外异常与地震及断裂活动性关系的研究已有 10 多年的历史。在这期间, 不少国内外学者对此进行探索, 并取得了一定进展(Gorny *et al*, 1988; Andrew *et al*, 2002; 王洪涛, 强祖基, 1995; 郑兰哲等, 1996; 强祖基, 贲常恭, 1998)。近年来, 随着卫星遥感技术的快速发展及其在地震领域的广泛应用, 越来越多的地震工作者投入到这项研究中, 并取得了一些研究成果(张元生等, 2002; 邓志辉等, 2003)。但是, 由于影响地表热红外辐射的非震因素复杂多变, 震兆热红外信息被淹没在复杂的背景噪声中。如何在这种强干扰弱信号的条件下有效地分离和去除各类非震因素的影响, 提取出真正与地震及其断裂活动有关的热信息还需不断积累震例, 做更深入的研究。

川滇地区是我国的强震多发区, 一些学者已对卫星热红外异常与川滇强震活动性的关系进行了探讨。强祖基等对 1996 年云南丽江地震进行了研究, 发现震前 53 天红河断裂带出现增温异常(强祖基, 贲常恭, 1998); 邓志辉等(2003)对 2000 年云南姚安地震进行了研究, 也发现震前沿红河断裂出现了增温异常。2003 年云南大姚又发生了两次 6 级以上地震。本文针对这两次地震, 对川滇地区, 特别是红河断裂带 1999 年、2003 年和 2004 年的卫星热红外影像进行了分析研究, 得出了一些新的认识。

* 国家自然科学基金重大研究计划(90202018)资助。

2005-01-31 收到初稿, 2005-08-29 收到修改稿, 2005-10-24 决定采用。

1 研究区域与资料

2003年7月21日云南大姚发生了6.2级地震，震中位于 $101.2^{\circ}\text{E}, 26^{\circ}\text{N}$ 。2003年10月16日云南大姚又发生了6.1级地震，震中位于 $101.3^{\circ}\text{E}, 26^{\circ}\text{N}$ 。这两次地震都发生在川滇菱形块体内部，震中位置几乎重合。在震中附近约 $60\sim70\text{ km}$ 的范围内，地表无明显的活动断裂，也无历史地震记录，但在这一距离以外断裂构造发育，强震活动频繁。为研究这两次地震活动在卫星热红外影像上的反映，本文以 $97^{\circ}\sim107^{\circ}\text{E}, 22^{\circ}\sim33^{\circ}\text{N}$ 的区域为研究对象，利用NOAA16/AVHRR极轨气象卫星热红外遥感图象，对该区域内1999年、2003年和2004年的地表热红外辐射亮温进行对比研究。为避免太阳辐射及云层的干扰，所选用图象均为夜间3~4点且晴空条件下的影像。图1给出与文中影像图范围对应的地震构造背景。图中带阴影的两个圆圈表示2003年两次地震的震中。

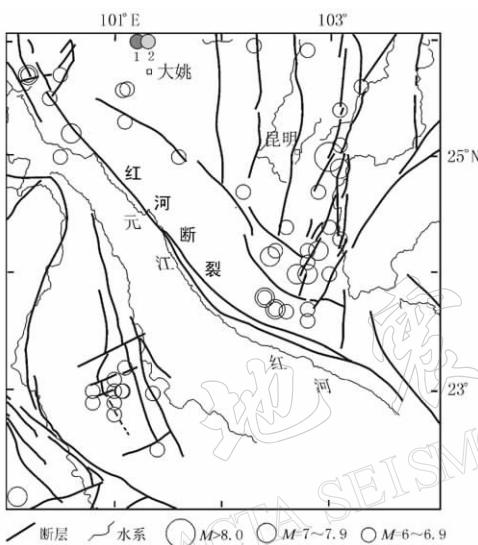


图1 研究区地震构造(范围与图2、

图3所示的影像图相同)

1, 2 表示 2003 年云南大姚两次地震的震中

的数据源，数据计算精度为 0.1 K ，陆面和海面温度的反演主要用这两个波段。

2 红河断裂带的热红外影像特征

2.1 地震发生前后1个月的红外影像特征

首先对研究区域内震前震后1个月的热红外影像进行分析解译。对于2003年7月21日的6.2级大姚地震，由于正值雨季，川滇地区天天有云层覆盖，卫星影像上反映的全是云顶亮温，几乎得不到来自地面的热辐射信息。因此，无法进行地表热红外异常分析。对于2003年10月16日的6.1级大姚地震，由于已过了雨季，川滇地区云层覆盖率有所降低，图象质量较好。从筛选出的可用图象上我们发现，在9月23日、24日及26日的影像上红河断裂表现为明显的高温条带。该高温条带沿红河断裂呈NW向展布，向北西方向宽度逐渐变窄，亮温逐渐降低，在北纬 25° 附近尖灭；向南东方向宽度逐渐增大，亮温也有所升高，在北纬 22° 以南渐渐消失。其亮温值较周围平均高约 $1\sim1.5\text{ K}$ (图2a)。

NOAA是美国于20世纪60年代开始发射的系列极轨气象卫星，在距地约 870 km 的近圆形轨道上过极地环绕地球飞行。飞行周期约102 min，每天可昼夜各一次对地面同一地点进行重复扫描。上载的AVHRR探测器横向扫描宽度约为 2700 km ，星下点空间分辨率为 1.1 km ，有5个光谱探测通道。其中，第一、第二通道($0.58\sim1.0\text{ }\mu\text{m}$)为可见光和近红外通道，主要反映地气系统物体的反照率；第三通道($3.55\sim3.93\text{ }\mu\text{m}$)为中红外通道，对高温敏感，适合对下垫面的异常高温点进行探测，如森林火点、草原火灾等；第四、第五通道($10.5\sim12.5\text{ }\mu\text{m}$)为热红外通道，反映常温下(约 300 K)地气系统的长波辐射，为研究地面热场分布提供了丰富

在震后 10 月 22 日、11 月 6 日及 11 月 8 日的热红外图象上, 该高温条带依然出现, 并且展布方向、规模及亮温值与震前类似(图 2b). 之后, 我们对研究区 2003 年全年的 NOAA16 卫星热红外影像进行了分析解译, 发现沿红河断裂的高温条带出现在所有晴空影像上, 并非仅出现于地震前. 可见, 仅靠 2003 年一年的资料很难说明该高温条带与 2003 年发生的这两次地震的关系, 还需要将 2003 年的资料与其它无地震年份的资料进行对比.

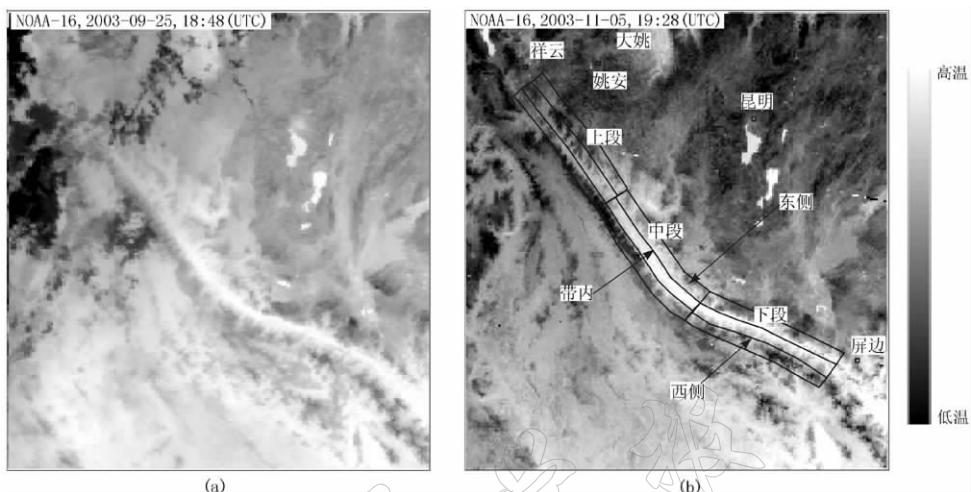


图 2 2003 年 10 月 16 日大姚地震前后红河断裂带亮温图象

(a) 2003-09-26T02:48 地震前; (b) 2003-11-06T03:28 地震后

2.2 无地震发生年份的红外影像特征

1999 年和 2004 年, 我国地震活动相对平静, 不仅多震的川滇地区未发生 6 级以上强震, 全国范围内也未发生强烈地震. 因此, 我们利用 1999 年和 2004 年的红外影像资料与 2003 年进行对比, 以便进一步探索地震年份与无震年份红河断裂带的红外影像差异. 为此, 挑选研究区内 1999 年和 2004 年夜间 3~4 时晴空条件的 NOAA16 热红外影像. 经过辐射校正、几何校正和局地投影等图象预处理后得到分别用灰度和伪彩色表示的热红外亮温图象. 结果显示, 在所有晴空条件下的夜间影像上, 沿红河断裂的高温条带均有出现, 并且其展布位置及影像特征与 2003 年类似(图 3a, b). 这说明此高温条带是由红河断裂带周围地表自然因素控制的固有影像结构, 并非仅出现于地震发生之前. 因此, 也就不能直接将其视为震兆异常.

3 红河断裂高温条带的红外亮温年变特征

如前所述, 沿红河断裂的高温条带在地震年份和非地震年份均有出现, 但是, 这并不能排除其与 2003 年两次大姚地震及红河断裂热活动性的关系. 因为, 地震前的热红外异常是一种动态信息, 不仅隐含于复杂的地表热辐射信息中, 而且相对于气象因素而言, 它对地表温度的影响幅度也比较小. 因此, 有时可能还不足以在影像上形成明显与气象过程不符的红外异常现象, 但通过同一区域不同年份相同时相红外亮温值的统计比较和差值运算, 则有可能揭示出异常的变化趋势. 为此, 我们对红河断裂高温条带进行分区分段的亮温统计, 以反映其在不同年份的亮温时间变化过程及细微差异.

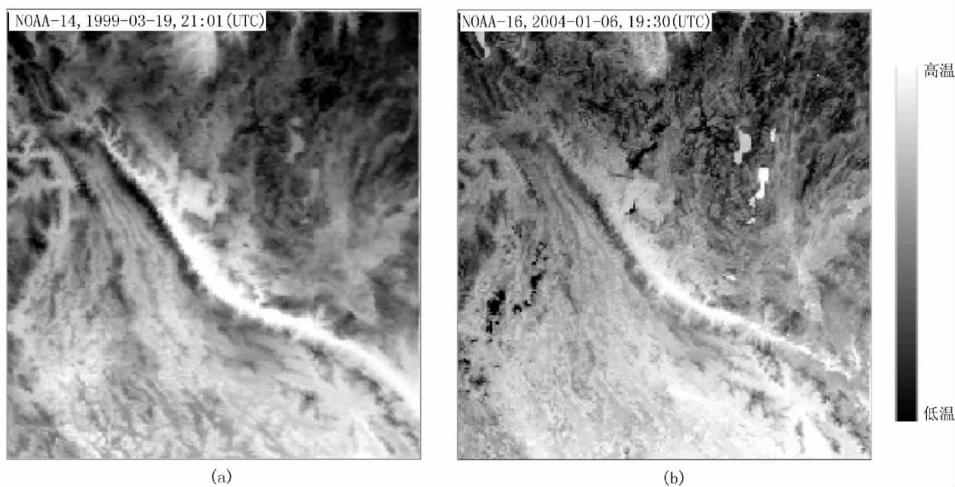


图 3 1999 年和 2004 年红河断裂带热红外亮温图象

(a) 1999-03-20T05:01; (b) 2004-01-07T03:30

3.1 亮温统计方法

将红河断裂高温条带的祥云至屏边段, 从纵向上分成上中下 3 段, 每段长约 130 km; 从横向上分成西侧、带内和东侧 3 条, 每条宽约 10 km. 然后对每个 $130 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的条形区域, 按像元级逐点读取亮温值, 并计算其平均亮温. 条形区域位置如图 2b 所示. 为提高统计结果的可靠性与可比性, 只选用夜间晴空条件下的影像参与统计. 由于川滇地区特殊的地形和气候条件, 这里云雾覆盖率很高, 可用的晴空影像较少, 5~8 月份的夜间红外影像全部被云层覆盖, 不能利用. 因此, 文中只用了 1~4 月和 9~12 月的数据, 而且每个月可用的图象数目不等, 多的有 10 多幅, 少的仅几幅.

3.2 亮温统计结果

利用上述方法对 1999 年、2003 年和 2004 年的热红外影像进行了亮温统计. 结果表明, 这 3 年红河断裂高温条带的亮温变化趋势大体一致. 从横向上看, 均为条带内的亮温均值高于其东侧, 东侧的亮温均值又高于西侧(图 4a); 从纵向上看, 均为高温条带中段的亮温均值略高于下段, 而下段又高于上段(图 4b). 但从整个高温条带的亮温年均值看, 2003 年明显高于 1999 年和 2004 年, 平均约 1 K 左右(图 4c). 这说明与 1999 年和 2004 年相比, 2003 年红河断裂带整体温度偏高, 这可能与 2003 年发生的两次 6 级以上地震有关.

4 红河断裂高温条带的成因及其与地震活动性的关系

4.1 高温条带的成因

地表热红外辐射亮温主要受地形和气象的影响. 相对而言, 前者属于静态影响因素, 主要控制区域内地表温度的空间分布. 一般情况下, 等温线与地形等高线近乎平行, 但值呈负向变化. 后者属于动态影响因素, 主要决定区域内地表温度的时间变化过程, 其作用叠加于地形因素之上. 而河流、湖泊等水体由于热惯量大, 温度变化滞后, 因而在夜间的红外影像上表现为明显的高温标记. 从图 1 可知, 红河断裂位于元江(上游)和红河(下游)河谷, 因此, 其在夜间的晴空影像上会表现为明显的高温条带. 图 5 给出高温条带的地形

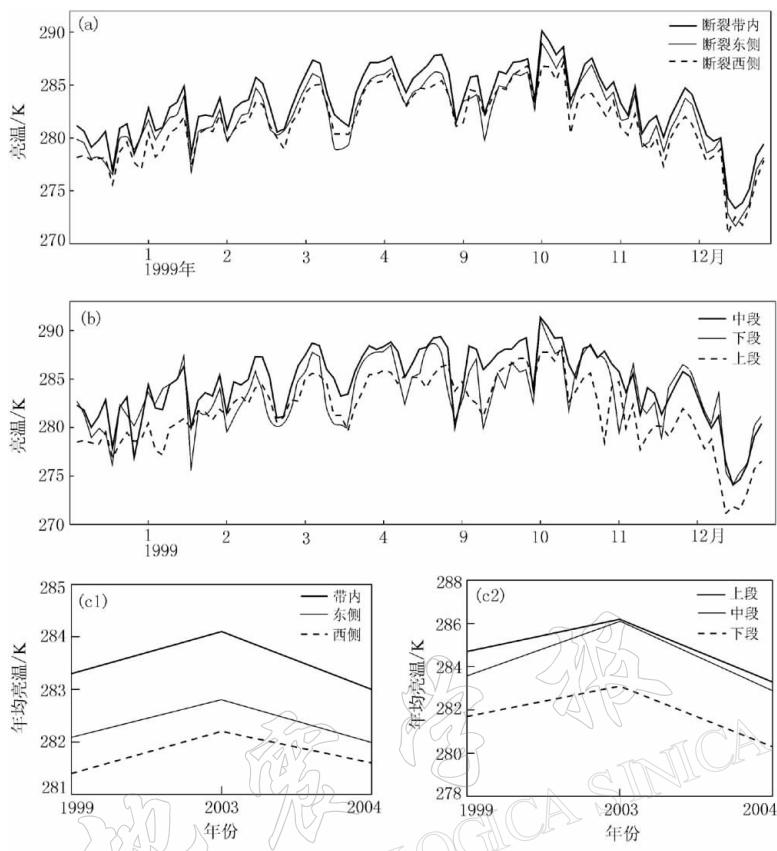


图 4 红河断裂高温条带亮温年变曲线

(a) 高温条带内与其东西两侧的亮温年变对比曲线; (b) 高温条带上、中、下 3 段亮温年变对比曲线;
 (c) 1999、2003 和 2004 年高温条带内亮温年均值对比曲线

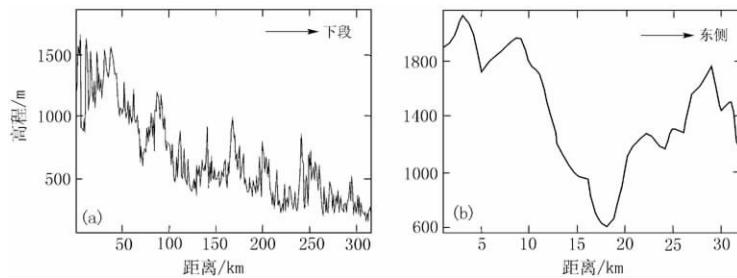


图 5 红河断裂高温条带地形剖面

(a) 纵剖面; (b) 横剖面

纵横剖面, 其中图 5a 为沿条带中心线的地形纵剖面, 图 5b 为过条带中部的地形横剖面。图 5a 表明, 从高温条带的上段到下段地形高程逐渐降低, 且上段与中下段的地形落差大, 中下段高程接近。而亮温统计结果正好是从上段到下段亮温增大, 且中下段亮温接近。图 5b 表明, 高温条带中部与其东西两侧的地形高差悬殊, 且西侧地形略高于东侧。而亮温统计结果表明条带内亮温高于东西两侧, 东侧又略高于西侧。这说明红河断裂高温条带是由

其所处的地理环境所致.

4.2 高温条带与地震活动性的关系

上述分析表明, 沿红河断裂的 NW 向高温条带是由水系和地形因素所致, 并非仅出现于大姚地震前. 但从高温条带的亮温年均值看, 2003 年明显高于 1999 年和 2004 年, 这不能排除与 2003 年发生的两次大姚地震的关系. 2003 年由于有强震发生, 而导致红河断裂热活动性增强, 引起断裂带整体热红外亮温偏高是可能的. 此外, 3 年中这一高温条带上、中、下 3 段的亮温变化关系均为中段略高于下段、下段高于上段. 按照地表亮温与纬度和地形高程均成负相关的原则, 下段为红河河谷下游, 地形更加低洼, 纬度也降低了约 1° , 因此, 其亮温应高于中段, 但实际情况正好相反. 我们认为这有可能与红河断裂的分段活动性有关. 从红河断裂的构造活动性参数看, 中段的水平滑动速率为 0.5 mm/a , 而下段的水平滑动速率仅为 0.05 mm/a , 这说明中段的活动性较强. 中段表现出的高亮温也正与此一致. 可见, 虽然红河断裂高温条带不是大姚地震的热红外前兆异常, 但其红外亮温变化仍与地震活动有关, 不仅在地震年份表现出高温年变异常, 而且在断裂的不同地段也表现出不同的亮温变化特征. 利用卫星热红外遥感资料, 通过监测不同年份之间高温条带的相对活动水平, 可以对这种地震前的断裂热活动性进行监测和异常判断.

5 结语

卫星热红外遥感技术为研究地震提供了崭新的观测手段, 通过卫星热红外来监测地震前的断裂热活动性是很有前景的研究课题. 本文通过对川滇地区 1999 年、2003 年和 2004 年卫星热红外影像资料的综合分析, 得出以下几点初步认识:

- 1) 沿红河断裂的 NW 向高温条带不仅出现于地震前, 而且出现在所有的夜间晴空红外影像上. 因此, 它不是大姚地震的前兆异常, 而是由水系和地形因素共同作用而形成的自然影像特征.
- 2) 在有地震发生的年份, 红河断裂高温条带的亮温年均值高于无地震发生的年份. 利用卫星热红外遥感对这种地震前的断裂热活动性进行监测和异常判断时, 必须考虑到不同年份之间亮温条带的相对活动水平.
- 3) 断裂带的不同地段现今活动程度不同, 其热红外辐射特性也会有差异. 通过对断裂带不同年份、不同地段卫星热红外辐射亮温的统计分析与差值对比, 有可能为断裂的分段性研究提供依据.
- 4) 从目前的研究看, 震兆热红外异常识别的可靠性与所用资料有直接关系. 针对同一震例, 选用不同时空范围的资料进行研究, 有可能得出不同的结果. 有些热红外现象在短期内好象是震兆异常, 但从较长的时限上分析就不是了. 因此, 要从复杂的热红外信息中挖掘出真正与地震活动有关的热信息, 必须从不同的时空尺度上加以对比分析, 不仅要抓住震前震后一个月甚至几个月的资料, 还要利用几年甚至多年的资料才有可能排除非震因素的影响.

参 考 文 献

- 邓志辉, 王煜, 陈梅花, 等. 2003. 中国大陆几次强地震活动的卫星红外异常分析[J]. 地震地质, 25(2): 327~337
强祖基, 贾常恭. 1998. 卫星热红外图象亮温异常——短临震兆[J]. 中国科学, D辑, 28(6): 564~573

- 王洪涛, 强祖基. 1995. 应用卫星热红外异常预测地震的研究[J]. 地球科学进展, **10**(6): 537~541
- 张元生, 沈文荣, 徐辉. 2002. 新青 8.1 级地震前的卫星热红外异常[J]. 西北地震学报, **24**(1): 1~6
- 郑兰哲, 强祖基, 贾常恭. 1996. 卫星热红外影象在地震短临预报中的应用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, **21**(6): 665~668
- Gorny V I, Salman A G, Tronin A A, et al. 1988. The Earth outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity [A]. *Proceedings of the Academy of Science of the USSR*, **301**: 67~69
- Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A. 2002. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China[J]. *Journal of Geodynamics*, **33**: 519~534

FORMATION CAUSE OF THERMAL INFRARED HIGH TEMPERATURE BELT ALONG HONGHE FAULT AND ITS RELATION TO EARTHQUAKES

Qu Chunyan Shan Xinjian Ma Jin

(State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at two Dayao earthquakes with magnitude more than 6 occurred in 2003 in Yunnan, we analyzed and interpreted the NOAA satellite thermal infrared images of 1999, 2003 and 2004 in Chuan-Dian region, and also calculated the annual variation of brightness temperature of the hot belt along Honghe fault to explore the formation cause of the high temperature belt and its relation to the earthquakes. The results show that the high temperature belt along Honghe fault is caused by geographic environment factors, such as water system and terrain. But the annual average brightness temperature of the belt in earthquake year of 2003 is clearly higher than in no earthquake years of 1999 and 2004, this maybe indicate that the thermal activities of Honghe fault increase in earthquake years, and can cause the annual variation anomaly of brightness temperature. We can detect and monitor this thermal activities of Honghe fault before earthquake by analyzing and comparing the relative changes of thermal infrared brightness temperature of the hot belt in several different years.

Key words: thermal infrared remote sense; annual variation anomaly; earthquake precursor; fault activity