

卫星热红外遥感资料在地震预报中的应用研究

郭 晓^{1,2}, 张元生^{1,2}, 钟美娇²

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用 NOAA—AVHRR 数据通过 Becker & Li 地温计算模型反演, 得到有关地震发生前后每日的地表温度分布图像, 然后进行逐日的地表温度分布图像以及震源区地表温度平均值日变时序曲线分析。结果表明震前出现了较明显的热红外地震前兆异常。最后指出, 从 NOAA—AVHRR 数据中利用分裂窗技术反演陆地表面温度结果容易受到云层的干扰, 但是更高空间分辨率和光谱分辨率的 EOS/MODIS 数据的产生以及由于 EOS/AMSU 能够透过云层探测到地表亮温, 必将使卫星遥感热红外信息在地震监测预报中的应用范围及深度上得以拓展。

关键词:卫星遥感; 热红外资料; 地震预报; 应用研究

中图分类号: TP79; P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)03-0223-05

Study on Thermal Infrared Data of Satellite Remote
Sensing Applied to Earthquake PredictionGUO Xiao^{1,2}, ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, ZHONG Mei-jiao²

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through retrieving the data of NOAA—AVHRR, the daily land surface temperature distribution images before and after some earthquakes are obtained by using the land surface temperature calculation model of Becker & Li. Then these images and the curve of daily land surface temperature average value for the epicenter area of the events are analyzed. The result shows that there are visible thermal infrared precursor anomalies before the earthquakes. Finally, it is pointed out that the retrieving land surface temperature from NOAA—AVHRR data by split window technique is fairly disturbed by cloud layers, but as the appearance of EOS/MODIS data with high space and spectrum resolution and their capability of observing land surface temperature through cloud layer, the thermal infrared information of satellite remote sensing will be more deeply and widely applied in earthquake prediction.

Key words: Satellite remote sensing; Thermal infrared datum; Earthquake prediction; Applied study

0 引言

自 20 世纪 80 年代末以来, 随着卫星遥感技术的迅速发展, 在地震预测预报中也提出了利用卫星热红外遥感技术进行地震预测的方法。国内外不少地震学者作了大量的地震红外异常机理^[1-3]、岩石实验^[4]、红外遥感技术的应用方法及典型震例^[5-7]对

比分析研究, 取得了许多有意义的研究结果。典型震例卫星热红外波段的温度资料分析结果表明震前确有增温现象。地震热红外异常很可能是通过地表和底层大气表现出来, 直接原因是目标物的辐射温度发生变化。如何提取目标物的辐射温度是解决关

收稿日期: 2005-05-26

基金项目: 国家“十五”科技攻关课题(2004BA601B01-02-02); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2005023

作者简介: 郭 晓(1974—), 男(汉族), 江西上高人, 在读硕士研究生, 现主要从事卫星遥感应用及地震预报方法工作。

键问题的重要环节。本文试图利用 NOAA—AVHRR (the Advanced Very High Resolution Radiometer) 数据通过 Becker & Li 地温计算模型反演得到有关地震发生前后每日的温表温度分布图像, 然后对其进行逐日的地表温度分布图像以及震源区地表温度平均值日变时序曲线分析, 研究分析强震前的地表温度场异常分布和变化特征。

1 基于 NOAA—AVHRR 的地温计算方法

1.1 数据预处理

研究中所使用的遥感数据源是从 National Environmental Satellite Data and Information Services (NESDIS) 获取的 NOAA—AVHRR 的 5 个波段数据。研究对象为 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊附近海域 8.7 级地震, 2003 年 9 月 27 日中俄蒙交界 7.9 级地震, 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹 6.1 级地震, 1997 年 4 月 11 日新疆伽师 6.6 级地震。选择的数据范围为以每个震中为中心, $\pm 2^\circ$ 纬度, $\pm 3^\circ$ 经度的矩形区域, 时间范围从震前的一个多月开始, 至震后的半个月止。遥感数据预处理内容包括:

(1) 几何精校正。其目的是消除几何畸变, 赋予每个像元准确的空间位置。AVHRR 图像几何精纠正是通过等面积圆锥投影变换来实现的。

(2) 通道分离。由于 NOAA 1B 数据是经过装配存储的, 即 AVHRR 五个通道的每一扫描行数据顺序存储, 在读取时要首先将其拆开, 即进行通道分离。主要包括以下几项内容: ① 轨道预览 (升轨或降轨) 及扫描线信息 (扫描线数, 扫描线时间等); ② 定标系数、太阳天顶角和地理经纬度的分解及转换; ③ AVHRR 辐射计数据的读取。

(3) 图象定标。通过定标将 AVHRR 的计数值换算为物理量。由于在 1B 数据中, AVHRR 数据所记录的是星上仪器测量的计数值, 在使用时要将其换算成物理量。AVHRR/2 (Version 2 of the Advanced Very High Resolution Radiometer) 甚高分辨率辐射计的红外和可见光采用相同的定标公式:

$$E_i = A_i I_i + B_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

其中 A_i 和 B_i 为定标系数; I_i 为 AVHRR 探测值; E_i 为经标定后的物理量值。但是 AVHRR/3 (Version 3 of the Advanced Very High Resolution Radiometer) 甚高分辨率辐射计的红外与可见光采用

了不同的定标公式。红外波段的定标公式增加了一个二次项, 公式为

$$N_E = a_0 - a_1 x C_E + a_2 x (C_E)^2 \quad (2)$$

式中 a_0, a_1, a_2 为定标系数; C_E 为 AVHRR 探测值; N_E 为经标定后的物理量值。

(4) 太阳天顶角订正。对可见光和近红外波段的数据进行太阳天顶角订正:

$$E_c = E(z) \cos(z) \quad (3)$$

其中 $E(z)$ 为定标后的反射率; z 为探测点的太阳天顶角。

1.2 地温计算模型

Becker & Li 根据热辐射传导的地方性特征提出的著名算法已得到了较广泛的引用。这一算法有如下形式:

$$T_s = 1.274 + P(T_4 + T_5)/2 + M(T_4 - T_5)/2 \quad (4)$$

式中, T_s 表示地面温度; T_4, T_5 分别代表 AVHRR 第 4、第 5 通道的亮度温度, P 和 M 用则由下式求算:

$$P = 1 + 0.15616(1 - \epsilon)/\epsilon - 0.482\Delta\epsilon/\epsilon^2 \quad (5)$$

$$M = 6.26 + 3.98(1 - \epsilon)/\epsilon + 38.33\Delta\epsilon/\epsilon^2 \quad (6)$$

其中 ϵ 是 AVHRR 两热红外通道的平均辐射率, 即 $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$, $\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$ 。他们是用 LOWTRAN 7.0 模型来模拟地表热辐射并根据这一模拟结果计算其常数。

2 震例分析研究

2.1 2003 年 9 月 27 日中、俄、蒙交界 7.9 级地震

2003 年 9 月 27 日中、俄、蒙交界 7.9 级地震发生在阿尔泰—戈壁阿尔泰褶皱带与蒙古地块交接的乌列盖活动断裂带。该断裂是分割阿尔泰、西萨彦、蒙古 3 个块体的构造, 总体呈北西展布, 断面北倾, 倾角陡, 延伸长度大于 500 km。利用 NOAA—AVHRR 热红外资料, 取纬度 $48^\circ \sim 52^\circ \text{N}$, 经度 $85^\circ \sim 91^\circ \text{E}$ 为研究区域, 通过上述反演算法进行了中、俄、蒙交界 7.9 级地震前后陆地表面温度场分布的反演, 得到了震前一个多月及震后约半个月时间段内的每日地表温度分布图像, 然后对其地表温度分布特点及其随时间的变化特征进行了跟踪分析。反演的地表温度分布图像显示, 从 9 月 4 日至 9 月 9 日震源区及其周围大部分地区出现了明显的大面积增温现象 (见图版 2, 图 1), 增温幅度近十几 K 左右; 此后地表温度开始回落并逐渐趋于正常分布。震源区地表温度平均值日变曲线更明显地反映了这

一变化过程(图 2),从 2003 年 8 月 12 日至 9 月 9 日震源区地表温度出现了明显的增温现象,增温幅度达到十几度,此后至地震前出现了降温过程,震后逐渐恢复了正常。震源区地表温度平均值日变曲线是通过利用反演的地表温度分布图像,选取以震中为

中心,纬度 0.4° ,经度 0.8° 的矩形区域对其进行平均处理,求得每日震源区地表温度的平均值,然后对其进行日变的时序分析而获得的。有些震源区地表温度可能受到云层的影响,如图中出现的相对低值,但一段时间内的变化趋势没有改变。

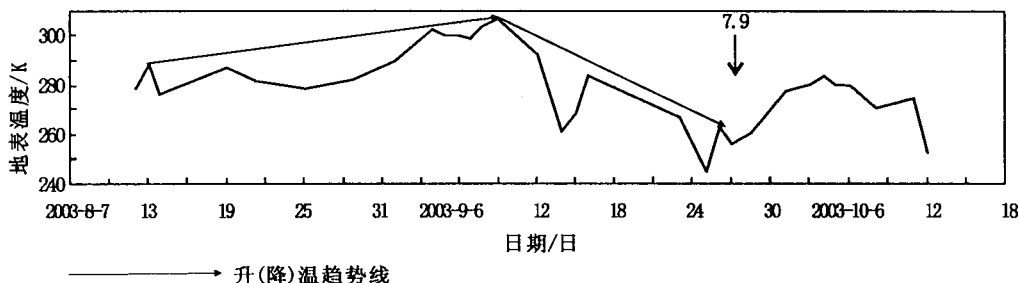


图 2 2003 年 9 月 27 日中、俄、蒙交界地震震源区地表温度平均值日变曲线
Fig. 2 Curve of daily land surface temperature average value in epicenter area of China, Russia and Mongolia Boundary Region earthquake on September 27, 2003.

2.2 1997 年 4 月 11 日新疆伽师 6.6 级地震

1997 年 4 月 11 日新疆伽师 6.6 级地震发生在塔里木地块西部边缘,是天山山脉与盆地之间连接的部位,属于天山南缘 EW 向地震活动带。这里是印度板块向北楔入的尖角与欧亚板块碰撞的接合部位,构造运动强烈。取 $38^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $74^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 为研究区域,同样通过上述反演算法得到了震前一个多月及震后约半个月时间段内的每日地表温度分布图像和地表温度平均值日变曲线。反演的地表温度分布图像显示,从 3 月 4 日至 4 月 6 日震源区及塔里木地块大部分地区出现了较为明显的大面积增温现象(见图版 2,图 3),增温幅度近 10 K 左右,呈现相对的高温状态;此后地表温度开始回落并逐渐趋于正常分布。震源区地表温度平均值日变曲线更明显地反映了这一变化过程(图 4),从 1997 年 3 月 4 日至 4 月 6 日震源区地表温度出现了较为明显的增温现象,增温幅度达到 $6\sim 8\text{ K}$,此后至地震前出现了降温过程,震后又逐渐恢复了正常。虽然在 3 月、4 月天气温度一般是呈正梯度变化,但在震前一段较

长时间内温度却明显地逐渐回落。

2.3 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹 6.1 级地震

2003 年 10 月 25 日在甘肃省民乐—山丹(38.4°N , 101.2°E ; 38.4°N , 101.1°E)连续发生 $M_s 6.1$ 和 $M_s 5.8$ 地震,发震断裂为民乐—大马营断裂(近 EW 向,逆断兼左旋,属祁连山北缘断裂)。取 $36^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $98^{\circ}\sim 104^{\circ}\text{E}$ 为研究区域,以同样方法得到了震前一个多月及震后约半个月时间段内的每日地表温度分布图像和地表温度平均值日变曲线。反演的地表温度分布图像显示,从 10 月 4 日至 11 月 5 日阿拉善地块大部分地区反复出现了明显的大面积增温现象(见图版 2,图 5),增温幅度近 10 K,呈现相对的高温状态。其中从 10 月 4 日至 10 月 23 日过震中有一 NWW 向的低温条带出现(见图版 2,图 5),此后低温条带变得有些模糊,震后低温条带完全消失。震源区地表温度平均值日变曲线显示(图 6),从 2003 年 10 月 14 日至 10 月 30 日震源区地表温度出现了一个较长时间内缓慢的升温过程,增温幅度达到近 10K,而在该地区 10 月份的天气一般是呈负

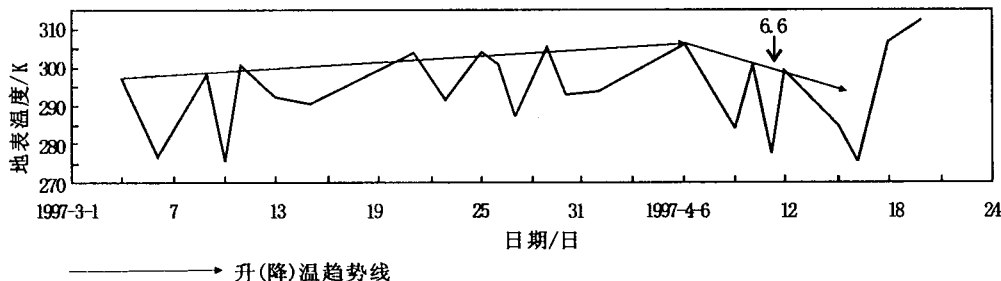


图 4 1997 年 4 月 11 日伽师地震震源区地表温度平均值日变曲线
Fig. 4 Curve of daily land surface temperature average value in epicenter area of Jiashi $M_s 6.6$ earthquake on April 11, 1997.

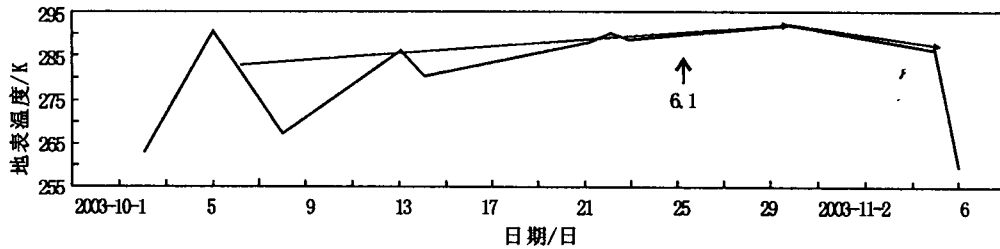


图 6 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹地震震源区地表温度平均值日变曲线
Fig. 6 Curve of daily land surface temperature average value in epicenter area of Minle—Shandan M_s 6.1 earthquake on October 25, 2003.

梯度变化的;地震发生几天后温度才开始回落。

3 结论与讨论

从上述震例分析中,可初步得出以下结论:

(1) 强震发生前一个多月时间内,震源区地表温度平均值出现了较为明显的异常升温 and 降温变化过程,持续时间一般在 25~40 天,幅度一般为几度至十几度。以 2003 年 9 月 27 日中、俄、蒙交界 7.9 级地震为例,参考邻近的敦煌某气象地温测点每日 22 时温度的日变曲线(图 7),这一地区的气候一般应该从 9 月开始变冷,在正常情况下温度场应以时间轴呈负梯度变化,一般不会出现较长时间的升温过程。而在震源区,地震前一个多月时间内地表温度平均值出现较长时间的升温过程和降温过程,与该区的正常温度场变化不相符。1997 年 4 月 11 日新疆伽师 6.6 级地震以及 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹 6.1 级地震的震源区地表温度平均值日变曲线也存在这种类似的异常变化过程。这种异常变化可能是地震发生前的一种前兆异常。

(2) 强震发生前后约一个多月时间内,震源区周围会出现大面积的增温现象。上述 3 个震例的逐日地表温度分布图像显示,地震前近一个月内震源区周围部分地区不断持续着大面积的高温状态,可能与该区应力在临震前的变化有关。

(3) 在民乐—山丹 6.1 级地震的逐日地表温度分布图像跟踪分析中,地震发生前的 NWW 向低温条带清晰可见,条带宽度为 20~30 km 左右,持续时间近 20 来天。这种现象是否也是一种前兆异常以及它的形成机理,有待进一步的研究和震例分析。

从 NOAA—AVHRR 数据中利用分裂窗技术反演陆地表面温度结果容易受到云层的干扰,特别是在低纬度地区,由于云雨天气偏多,影响就更为明显(2004 年 12 月 26 日发生在印尼苏门答腊附近海域的 8.7 级强震,反演的结果存在较严重的失真现象,可能与赤道附近天气多变有关),给震例分析研究工作中热红外地震前兆异常的判定带来不利的影响,消除云层影响这一世界性难题目前还没有得到圆满解决,所以本论文的反演地表温度技术方法更适用于中高纬度地区。但是,更高空间分辨率和光谱分辨率的 EOS/MODIS(EOS:美国地球观测系统,MODIS:中分辨率成像光谱仪)数据的产生,将进一步推动利用热红外辐射资料研究强震前的地表热异常场的工作,并可望在我国地震监测预报实践中得到广泛应用。此外,EOS/AMSU(AMSU:先进的微波探测器)由于能够透过云层探测到地表亮温,这必将使卫星遥感热红外信息在地震监测预报中的应用研究工作的领域在范围及深度上得以拓展。

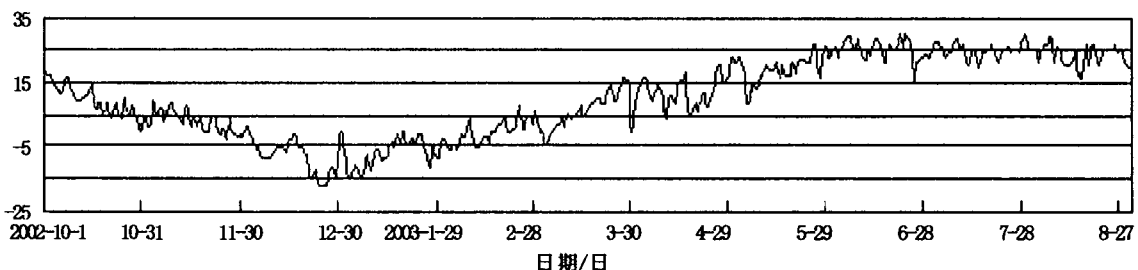


图 7 敦煌某一气象地温测点每日 22 时温度的日变曲线
Fig. 7 Curve of daily land surface temperature value measured at 10:00 p. m. from a survey point in DunHuang, Gansu province.

[参考文献]

- [1] Gabrielov A, Zaliapin I, Newman W I, et al. Colliding cascades model for earthquake prediction[J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 143 (2): 427—437.
- [2] 尹京苑, 房宗绯, 钱家栋, 等. 红外遥感用于地震预测及其物理机理研究[J]. *中国地震*, 2000, 16(2): 140—148.
- [3] 崔承禹, 支毅乔, 张晋开. 红外遥感用于地震预报的基础实验研究[A]. 见: 第八届全国遥感技术学术交流论文集[C]. 1993. 103—105.
- [4] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 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(增刊): 645—652.
- [5] 强祖基, 赁常恭, 等. 卫星热红外图象亮温异常——临震前兆[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(6): 564—573.
- [6] 徐秀登, 徐向民. 地震前红外异常的基本特征与成因机制[J]. *西北地震学报*, 2001, 23(3): 310—312.
- [7] 刘德富. 台湾集集强震前的卫星遥感长波辐射场变异分析[J]. *地球信息科学*, 2000, 2(1): 33—36.
- [8] 覃志豪, ZHANG Ming—hua, Arnon Karnieli. 用 NOAA—AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. *国土资源遥感*, 2001, 48(2): 32—42.
- [9] 张元生, 郭晓, 张小美, 等. 应用静止卫星热红外遥感亮温资料反演地表温度的方法研究[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(2): 113—117.
- [10] 张元生, 柳钦火, 郭晓. 卫星热红外遥感在地震预报中的应用与研究进展[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(4): 357—361.

(上接 222 页)

4 结论

上述表明,在剪切波速判别饱和土层液化的方法中,依据实际场况条件推导出的计算临界剪切波速的改进式(5)和式(11),使剪切波速判别饱和土层液化的结论更加真实可靠,能为抗震设计提供更合理的依据。但这些仅是我们在用剪切波速判别饱和土层液化方法合理性的探讨,还需要通过大量的实地调查和室内试验加以完善,特别是对修改后式(11)中的有相关系数的确定还需深入实际现场调查和统计研究。

[参考文献]

- [1] 水利水电工程地质勘察规范(GB50287—99)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [2] 祝龙根, 刘利民, 耿乃兴. 地基基础测试新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 92—93.
- [3] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 52—66.
- [4] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988. 94—108.
- [5] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化的剪切波速判别法[J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(1): 74—80.
- [6] 刘雪珠. 南京及其邻近地区新近沉积土的动力特征和砂土震液化试验研究[R]. 南京工业大学, 2003.
- [7] 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [8] 建筑地基基础设计规范(GB50007—2002)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 李国强, 等. 建筑结构抗震设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 2002.

郭晓等：卫星热红外遥感资料在地震预报中的应用研究

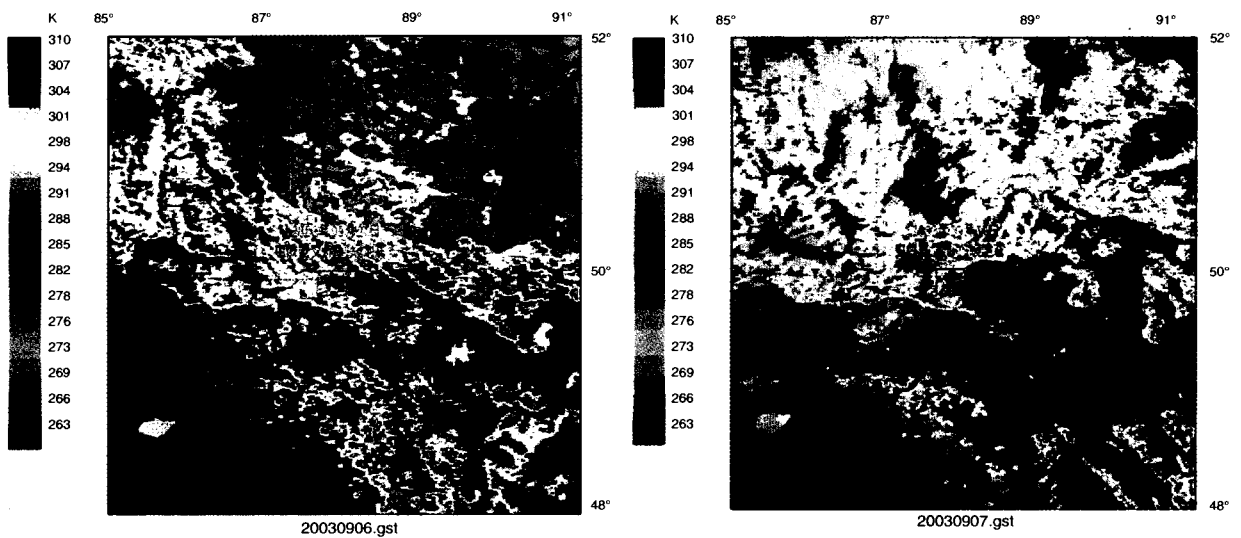


图 1 2003 年 9 月 5 日、7 日反演的中、俄、蒙交界地区地表温度分布图像

Fig.1 The retrieved land surface temperature distribution images of China, Russia and Mongolia Boundary region.

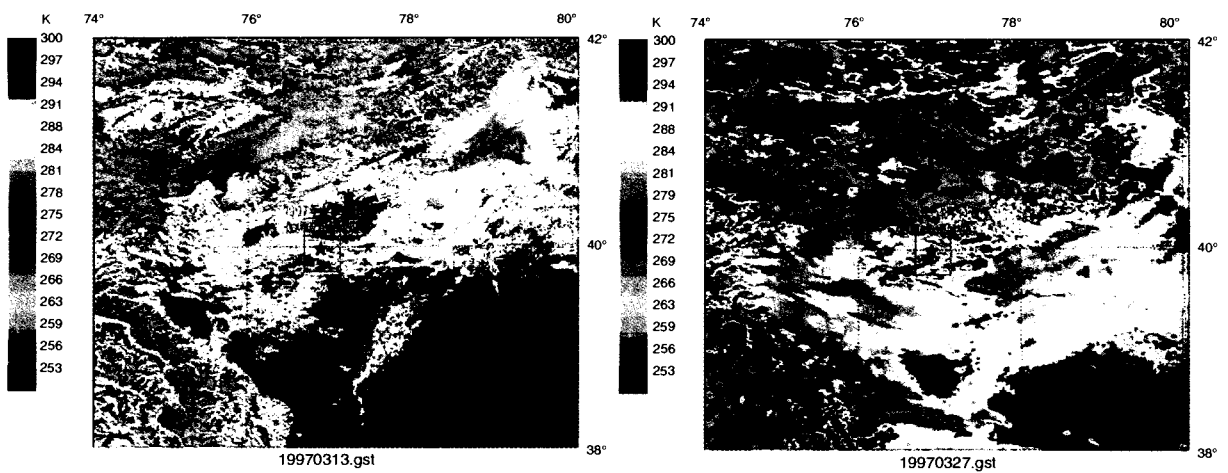


图 3 1997 年 4 月 13 日、27 日反演的伽师震源区地表温度分布图像

Fig.3 The retrieved land surface temperature distribution images of the epicenter area of Jiashi earthquake.

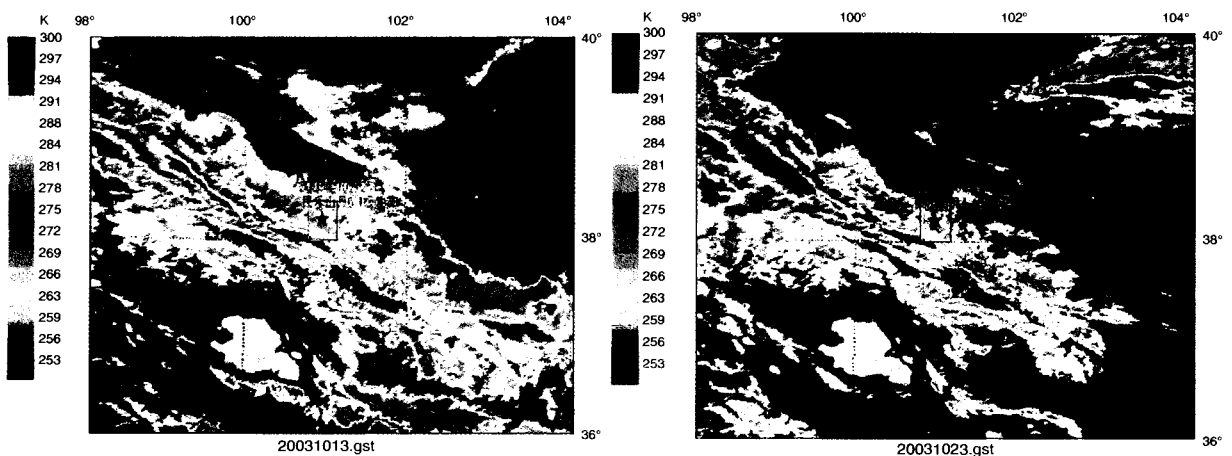


图 5 2003 年 10 月 13 日、23 日反演的民乐—山丹震源区地表温度分布图像

Fig.5 The retrieved land surface temperature distribution images of the epicenter area of Minle-Shandan earthquake.