

大同一阳高地地震地热异常与机理初探

杨修信 陈沅俊
易志刚 吕悦军 赵京梅

(国家地震局地壳应力研究所)

摘 要

1989年10月大同一阳高地地震前后,距震中约75km的三马坊地热测点的高精度地温观测仪器(分辨率 0.0001°C),记录到持续50多天、温度上升幅度达 0.15°C 的明显的地热异常。本文研究了该异常变化的特点。在总体上,异常为幂函数型升温形态。在地震发生前几天,地热异常呈现“相对下降—下降速率变缓—急剧回升—短时平稳—地震发生”的过程。本文还对地热异常的机理进行了初步探讨。

近些年来,国内外一些学者注意到热在地震孕育和发生过程中的作用,并开展了有意义的研究工作^(1,2)。自我国高精度地热动态观测系统研制成功并投入野外试验观测以来,在地热前兆研究方面取得了一些新的进展⁽³⁾。自1989年10月18日开始,山西省大同一阳高发生了最大震级为 $M_s 6.1$ 的强震群。震中区以东约75km的河北省阳原县三马坊地热动态观测点,在震前观测到了明显的地热前兆异常。本文分析了该地热前兆异常特征,并对其机理进行了初步探讨。

一、测点和观测仪器概况

三马坊地热观测点处在北东向桑干河断裂和北北西向化稍营断裂的交汇部位(图1)。观测井为200米深的自流井,井孔封闭良好。测温探头位于水下10多米深处。在正常情况下,其流量、温度保持基本稳定(图2a)。

地热观测使用付子忠等研制的SZW型高精度数字式石英温度计。其测温分辨率为 0.0001°C ,稳定性为 $0.01^{\circ}\text{C}/\text{年}^{(4)}$ 。通过滇西地震实验场十多个台站多年的连续观测使用,证明该温度计适用于野外条件下的地热前兆观测,并有较好的地震短临前兆监测能力。

1) 付子忠, 澜沧—耿马7.6级地震地热前兆异常, 1989。

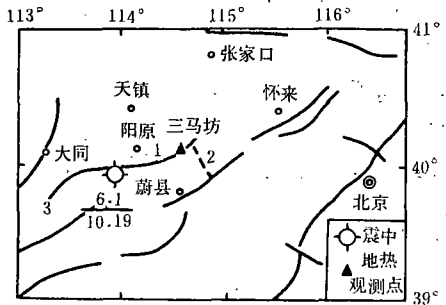
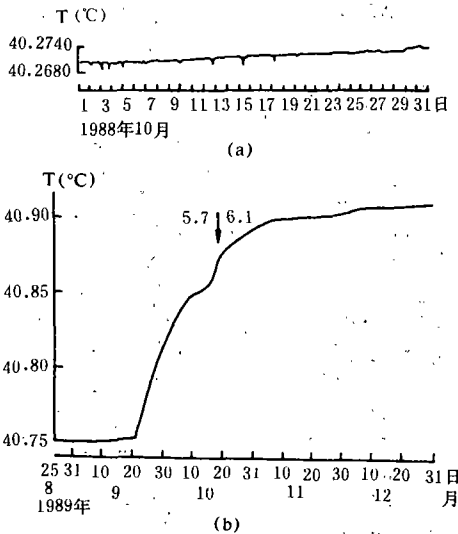


图 1 三马坊地热观测点和大同一阳高地震震中位置

- 1. 桑干河断裂
- 2. 化稍营断裂
- 3. 六棱山山前断裂

Fig. 1 Locations of Sanmafang geothermal observatory and the Datong—Yanggao earthquake

温度急剧上升。22日08时至23日08时的日变化量为0.0090℃,是正常时段的70倍。之后,温度持续上升而其速率逐渐减小。10月10日温度日变化0.0030℃,是异常开始时的三分之一(图2b)。



- a. 1988年10月三马坊测点的地热观测曲线
- b. 1989年10月大同一阳高地震前后三马坊测点的地热观测曲线

Fig. 2 (a) Geothermal curve at Sanmafang Observatory in October 1988
(b) Geothermal curve observed at Sanmafang Observatory before and after the Datong—Yanggao earthquake of Oct. 1989

由于三马坊测点所处的构造部位较好, 井孔条件较理想, 观测仪器分辨率高、稳定性好, 因而其温度变化对周围一定范围内, 特别是桑干河断裂带附近的地震活动有较好的反应⁽⁵⁾。

二、大同一阳高地震前后的地热异常

1989年9月21日之前, 三马坊测点温度平稳而略有升高。28天内温度上升0.0032℃, 平均日变化约0.0001℃。自9月22日开始,

从10月11日开始, 温度观测曲线突然转平。15日以后, 升温速率又逐渐增大。在10月18日09时至20时的11个小时内, 温度骤然上升0.0121℃。在相对平稳近3小时之后, 22时57分发生大同一阳高5.7级地震, 次日01时01分又发生6.1级地震。地震发生后, 温度仍继续上升, 而上升速率不断衰减。11月10日以后, 测点温度恢复到日变化万分之几度的正常范围以内(图2b)。

从9月22日温度大幅度上升开始, 至10月18日大同一阳高地震发生, 三马坊地热异常在震前持续近一个月, 温度累积升高0.1190℃。到震后测点温度趋于平稳为止, 异常变化达50多天, 温度升高0.15℃, 是正常变化幅度的20多倍。从异常持续时间和变化幅度来看, 三马坊测点在这次地震前后所出现的地热异常是非常明显的。

三、三马坊地热异常的特点及分析

大同一阳高地震前后三马坊测点的地热异常变化有以下几个特点:

1、在非常平稳的正常变化背景下, 温度观测值出现了较长时间、较大幅度的持续上升, 其升温速率随时间呈现有规律的衰减。

根据异常温度值在最初上升很快, 升温速率逐渐减缓而温度最终趋于基本稳定的特点, 我们选用双曲线、对数、指数和幂这四种函数, 分别对地热异常(除去临震前7天)的实测数据进行最小二乘意义下的回归计算。结果表明(表1), 用幂函数拟合的效果最佳。说明三马坊测点这次出现的地热异常, 总体上为幂函数型升温异常形态, 其回归方程为

$$T = 40.6801e^{0.00138t} \quad (1)$$

上式与表1中的T为温度(℃), t为时间(日)。

2、从地震前7天开始, 地温曲线偏离原来的变化趋势而相对转平或变缓。震前几小时突然急剧升温, 基本恢复到了原来的变化趋势。

表1 用不同函数对实测异常温度值回归计算结果

函数类型	曲线方程式	剩余平方和Q	剩余标准差S	相关指数R ²
双曲线	$1/T = a + b/t$	1.8483×10^{-2}	2.0495×10^{-2}	0.78493
对数曲线	$T = a + b \log t$	8.3342×10^{-4}	4.3522×10^{-2}	0.99030
指数函数	$T = ae^{b/t}$	8.7050×10^{-3}	1.4066×10^{-2}	0.89871
幂函数	$T = at^b$	8.2970×10^{-4}	4.3424×10^{-3}	0.99035

图3示出了异常时段的地温观测曲线、幂函数拟合曲线和以拟合曲线为基线所计算得到的震前几天的温度残差曲线。由图3a可见, 10月11日至18日, 温度观测值明显偏离幂函数拟合曲线。在幂函数型异常变化背景上所迭加的温度(残差曲线), 呈现“相对下降—下降速率变缓—急剧回升—短时平稳—地震发生”的下降型异常形态(图3b)。

3、地震发生之后, 测点温度仍按原来的幂函数形式, 并以不断衰减的速率继续上升, 直到逐渐趋于平稳。

纵观三马坊地热异常的全过程和阶段性特点易见, 在大同一阳高地震前近一个月和震后的一段时间内, 该测点出现了具有同一变化规律的温度异常, 地震事件只在较短时间内对其产生了较小的扰动。因此, 就异常的总体而言, 可能是测点温度对区域应力场增强变化的一种响应, 而主要不是来自震源的信息。大同一阳高地震的孕育、发生和三马坊地热异常的出现, 都是区域应力场活动的结果。因此, 它们之间可能主要是同源关系, 而不是因果关系。

从震前几天开始, 测点的温度明显受到一种新的因素的影响。单由这种因素所造成的测点温度的变化, 呈现“下降—转平—反向突升”的异常形态(图3b)。这种异常形态, 包括震前几小时所出现的“临震回跳”现象, 与“扩容”和“裂隙串通”孕震理论模式推论得到的地电阻率、地下水等前兆异常, 以及相应的实验结果非常相似, 与某些地震前实际观测到的异常, 如地温异常形态基本一致⁽⁹⁾(图4)。可以认为, 三马坊测点的温度变化在临震前受到了震源作用的影响。迭加在幂函数型升温异常变化中的温度“下降—回升”过程, 可能是由震源应力场作用产生的, 它所反映的是震源孕育过程的某种信息, 是以地热变化的形式表现出的地震即将发生的预兆, 因而可称这一变化为地热前兆异常。

综上所述, 在大同一阳高地震前后, 三马坊测点出现了持续50多天的地热异常, 其中迭加了由震源孕育所引起的几天时间的地震前兆异常。这次地热异常变化, 是区域应力场与震源应力场迭加作用的结果, 而在临震前几天内, 震源应力场的作用尤为明显。

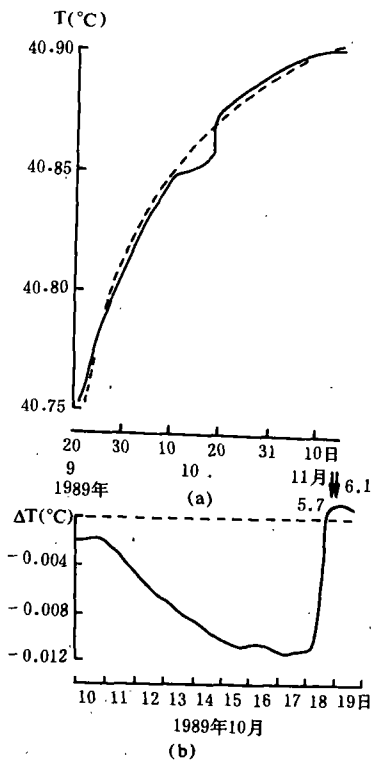


图 3

(a) 用幂函数对三马坊地热异常观测值的拟合结果

(实线为观测值, 虚线为拟合曲线)

(b) 大同—阳高地震前几天温度观测值偏离幂函数拟合基线的温度残差曲线

Fig. 3 (a) The result of fitting the observed values of geothermal anomaly to a power function

(b) The temperature residual curve deviating from the fitting datum line of the power function several days before the Datong—Yanggao earthquake

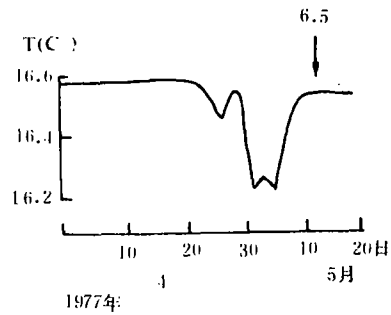


图 4 1977年5月12日唐山6.5级地震前唐山人民公园井(震中距65km)记录到的地温异常变化(据文献〔6〕)

Fig. 4 The geotemperature anomaly recorded at the well of the People's Park in Tangshan before the Tangshan Ms6.5 earthquake, on May 12, 1977

四、地热异常机理初探

前已述及,三马坊地热观测点位于桑干河断裂带上。而大同—阳高地震的控震断裂——六棱山山前断裂亦属于桑干河断裂带。可见该测点与此次地震在构造上有密切的联系。

野外观测和实验研究表明,地震前,震中周围与之有关联的断层会出现蠕动。断层蠕动可能是产生地震前兆的原因之一。地形变、地下水的异常变化就可能与断层蠕动有关〔6,7〕。华北北部断层位移测量资料的分析结果表明,在大同—阳高地震前后,该地区存在着明显的断层蠕动现象〔8〕。断层蠕动作为一种剪切摩擦滑动,必然会产生一定的热量。我们拟从地温变化与断层蠕动的关系,探讨三马坊地热异常的机理。

只考虑沿断层走向的蠕动位移。在某些假设条件下,断层带物质温度的上升量 ΔT 与断层蠕动位移 u 之间的关系可表示为〔9〕:

$$u \sim \Delta T \rho a c / \tau \quad (2)$$

式中 ρ 、 c 分别为岩石的密度和比热, a 为断层半宽度, τ 为断层面上的剪应力。根据有关研究结果〔10〕选取 (2) 式中的参数后,即可由实测温度变化通过 (2) 式求得断层的蠕动位移(图5)。

从计算结果可以看出：

1、由断层蠕动位移与其所产生的温度变化间的线性关系式(2)易见，图5示出的蠕动位移曲线总体亦呈幂函数形态，与实际观测到的许多断层蠕动曲线形态一致⁽⁷⁾。这在某种意义上说明，三马坊的地热异常变化与断层蠕动确有一定的关系。由于缺乏桑干河断裂蠕动的连续观测资料，尚无法对反演结果进行对比分析。

2、据三马坊地热动态观测结果，大同一阳高地震前近一个月内，测点温度升高约0.12℃。由(2)式可以求得，产生这样的温度变化量所相应的断层蠕动累积位移量约为1.86cm。断层沿其走向的这一蠕动速度，与实际观测到的一些断层的蠕动速度，以及按均匀应变积累与弹性位错理论反演得到的某些地震前震中区周围断层的平均走滑速度吻合^(7,10)。这说明，从地温变化与断层蠕动的关系去探讨大同一阳高地震前后三马坊地热异常的机理，二者在量级上是适宜的，因而具有一定的合理性。

断层蠕动是区域应力场增强的一种反应，也是向相关断裂(包括本断裂)端部和闭锁区转移应力和弹性应变能的一种形式，因而它可能促成或加速附近震源的孕育。在孕震后期，震源区应力高度集中，震源应力场作用范围比震源体本身的尺度要大得多。因此，距大同一阳高地震震中75km的三马坊测点，在这一阶段可能受到震源应力场的作用。在临震阶段，应力集中程度最高的闭锁区端部进入塑性变形状态，并出现裂隙的扩展、连通和断层的预滑移。震源体的这一变化过程，会导致其周围地区一定范围内的附加应力状态发生明显的转折变化^(12,13)：原来被压缩的地区，此时可能变为受拉张或压应力相对减弱；原来的膨胀区，此时可能改为受压缩或压应力相对增强。显然，发震断层在临震阶段的预位移方向与震时的错动方向一致。据大同一阳高地地震震源机制解资料⁽¹⁰⁾，10月18日和19日几次5级以上地震的震源机制解基本一致。18日22时57分首次5.7级地震的破裂面走向为28°，压力轴方位252°。这样，震源体在临震前的演化，便造成三马坊测点所在区域相对受到拉张应力的作用(图6)。

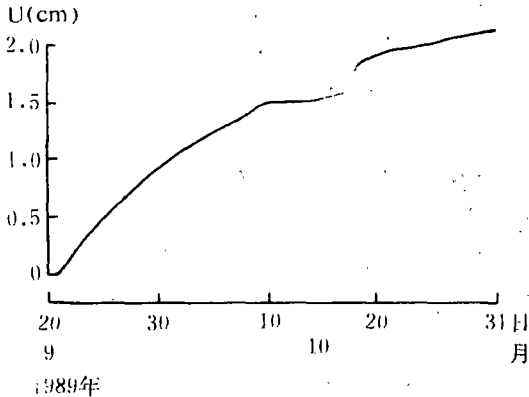


图5 由实测温度资料反演得到的断层蠕动位移曲线

Fig. 5 The displacement curve of the fault creep inverted by the observed temperature data

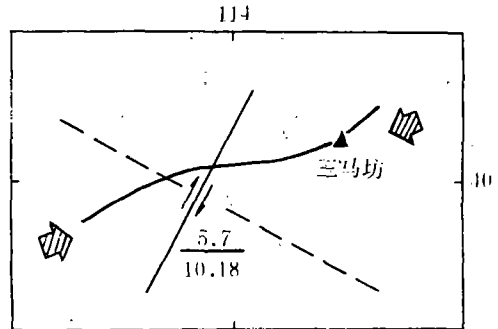


图6 1989年10月大同一阳高地地震震源模式和测点位置简图

Fig. 6 Sketch of the seismic source model of Datong-Yanggao earthquake in Oct. 1989 and the location of Sanmafang Observatory

而地下流体温度与地壳应力应变状态的关系显示^(1,15)，测点周围受压缩时，其温度一般为上升，拉张应力则一般对应温度下降。于是，由大同一阳高地地震临震前的震源活动，便导致三马坊地温呈现下降型前兆异常(图3b)。

五、结语

1989年10月大同一阳高地地震是在区域应力场增强的背景上发生的。区域应力场的增强,使得某些方向上的断层出现蠕动或蠕动加速,从而使断层物质温度上升。从三马坊地热观测点所处的构造部位,地热异常的幂函数形态和温度异常的幅度来看,这次持续50多天的升温地热异常,可能与桑干河断裂带的蠕动生热有关。它是区域应力场增强的一种效应和征兆,而不一定与某一次地震的孕育、发生有确定的和直接的联系,因而是一种“场兆”。

在大同一阳高地地震临震前的较短时间内,震源应力场对三马坊地温的变化产生了较明显的作用。它所引起的测点温度的变化,呈“下降一回升”形态。这是三马坊测点记录到的、有地震前兆意义的地热异常,是来自震源的前兆信息——“源兆”。它可从临震前震源区的预位移对周围地壳应力应变场—地温场影响的角度得到某种解释。

感谢付子忠副研究员和地热组对本工作的支持。

(本文1991年4月10日收到)

参考文献

- [1] K. Mogi, H. Mochizuki and Y. Kurokawa, Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes, *Tectonophysics*, Vol. 159, 1989.
- [2] 王林英、朱传镇,唐山地震和海城地震前地温的异常变化, *地震研究*, Vol. 7, No. 6, 1984.
- [3] 尤传侠,澜沧—耿马地震前后的地温异常变化, *地震研究*, Vol. 13, No. 2, 1990.
- [4] 付子忠、吕国贤, SZW-1型数字式钻孔温度计, *地震*, No. 1, 1984.
- [5] 杨修信、陈沅俊等,三马坊地热动态观测对附近地震活动的反应, *地震*, 待刊.
- [6] 马宗晋、傅征祥等,1966—1976年中国九大地震,地震出版社,1982.
- [7] R. L. Wesson, Dynamics of fault creep, *J. G. R.*, Vol. 93, 1988.
- [8] 高忠宁、蒋成恩等,大同一阳高6.1级地震断层位移测量前兆异常特征, *地震*, No. 4, 1990.
- [9] A. H. Lachenbruch, 摩擦生热、液压和断层运动阻力,金安蜀译, *国外地震*, No. 10, 1981.
- [10] 陈沅俊、杨修信等,震前地温的微变化与断层蠕动, *地震学报*, 待刊.
- [11] 张郢珍,唐山地震前地壳的异常隆起及无震蠕动, *地震学报*, Vol. 3, No. 1, 1981.
- [12] 郭增建、秦保燕,震源物理,地震出版社,1979.
- [13] 杨修信、陈沅俊,深部闭锁断层周围的应力场、应变场, *中国科学·B辑*, No. 8, 1989.
- [14] 张诚、曹新玲等,中国地震震源机制,学术书刊出版社,1990.
- [15] I. Furiya and H. Shimamura, Groundwater microtemperature and strain, *Geophysical Journal*, Vol. 94, 1988.

A STUDY ON THE GEOTHERMAL ANOMALY AND MECHANISM
OF THE DATONG—YANGGAO EARTHQUAKE

Yang Xiuxin, Chen Yuanjun

Yi Zhigang, Lu Yuejun, Zhao Jingmei

(Institute of Crustal Dynamics, SSB, Beijing, China)

Abstract

Before and after the Datong—Yanggao earthquake in October 1989, a high precision thermometer (resolution 0.0001°C) installed at the Sanmafang Observatory, which is about 75 km from the epicenter, recorded a significant geothermal anomaly. The amplitude of the anomaly is 0.15°C and the duration time is over 50 days. This paper discusses the characteristics of the abnormal temperature variation. As a whole, the variation has a shape of increasing temperature with a type of the power function, and is a temperature effect due to the fault creeping caused by the increase of regional stress field. Several days before the earthquake, the geothermal precursory anomaly showed a process that is, "declining—decline rate slowing down—sharply rising—short—term stableness—an earthquake occurring". The mechanism of the geothermal anomaly is also studied preliminarily.