

# 2016 年门源 6.4 级地震地脉动应变前兆 异常特征初步研究<sup>\*</sup>

张晓清, 袁伏全, 余 娜

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

**摘要:**以青海区域数字地震台网地脉动观测资料为基础, 对 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震前青海及周边的区域应变场进行分析研究, 总结了此次地震震前应变场的时空演化特征。研究结果表明: 在门源 6.4 级地震前, 区域应变场空间上表现为, 在震中附近出现张压相间的应变梯度带, 其张性和压性区域的应变强度大致相当; 应变强度在时间进程表现为, 随着发震时刻的临近, 震中附近区域应变强度在震前 6 天左右升高, 大约是背景值的 4 倍。

**关键词:** 门源地震; 地脉动; 地壳应变场

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)增刊 1-0035-08

## 0 引言

利用地壳位移场观测资料, 运用弹性力学理论可以得到地壳应变场。连续清晰的水平应变场对揭示地震孕育过程, 应变场的中短期前兆异常演化特征, 中强地震的发震地点、时间和震级的确定均有积极作用(阿提内·约克塞尔, 2001)。目前研究地壳应变场的方法主要分为 2 类: 第一类方法是对岩石的压力测试和数学模拟方法。陈颙等(1984)在研究受压岩石断层面形成过程中变形场的时空规律时发现岩石表面变形场压力增加、应力应变由分散到逐步集中的变化特征; 马瑾等(1979)在利用数字模拟方法研究断层闭锁区附近应变场演化中, 分析总结了震源体周围震前应变场的演化特征, 并对震中位置、发震时间和震级分别给出了判断方法。第二类方法是运用 GPS 观测资料开展地壳应变场前兆异常特征研究。自 20 世纪 80 年代以来, 随着中国大陆 GPS 观测网的建立, 运用 GPS 观测资料开展地壳应变场前兆异常特征研究在实践和理论方面都有了很大发展, 逐步形成了对我国大陆内部较大构造块体形变和应变的监测能力。在大量研究结果中, 不同研究者给出了一些 GPS 地壳运动与变

形图像。张希和江在森(1998, 1999)通过最小二乘配置法建立中国大陆水平运动速度场模型, 获得了基于连续介质假设的中国大陆水平应变场初步结果。王琪等(1998)运用红河断裂的 GPS 监测资料计算了该区域构造应力场; 江在森等(2008)以华北为例研究了区域应变时空特征及其与强震关系, 发现中强地震通常发生在剪切应变率的高值区及其边缘, 尤其是与构造变形背景相一致的剪应变率高值区。早期主要是使用 GPS 水准观测资料, 在中强地震地壳应变前兆异常特征研究领域取得了许多成果(江在森, 2003a, b, c, 2000, 2001, 2006; 王琪等, 1998, 戴黎明等, 2010), 这些成果对中强地震危险区的判定起到了不可或缺的作用。虽然运用 GPS 观测资料可以得到连续空间应变场结果, 但由于 GPS 连续观测站台网稀疏, 区域站复测周期为 2 年, 因此在时间上存在不连续的缺陷。本文试图运用在时间连续性和空间分布密度都优于 GPS 基准站的青海及其周边数字地震台网记录的地脉动资料, 借鉴 GPS 观测资料计算水平应变场的方法开展青海及周边区域应变场的计算, 给出 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震前 20 d 到震前 1 h 的水平应变场, 对门源 6.4 级地震的应变场时空前兆异常特征进行初步研究。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-08-23.

**基金项目:** 运用 GPS 与数字化地震资料开展青海及邻区强震危险性研究(2013-Z-710)和中国地震局星火计划(XH16039)联合资助。

## 1 资料选取及预处理

本文选取了青海区域台网中的 67 个地震台 (图 1) 2016 年 1 月 1 ~ 21 日每天 0 时所记录的地脉动资料。通过粗选去掉了断记较多和标定有问题的数据, 并去除了仪器响应, 对干扰信号进行了滤波处理。采用中离散 DB (Daubechies) 小波分析软件对观测数据进行了分析处理, 小波阶数为 10, 小波系数为 4 (图 2)。预处理之后, 进行功率谱计算分析。以信号强度大小确定参与区域应变场的计算的数据, 最终选定 0.01 ~ 0.15 Hz 频段的数据计算区域应变场。

以 2016 年 1 月 4 日 00 ~ 01 时 AXX 台地脉动资料为例, 通过小波分析, 从分出的 10 阶地脉动信号, 分别计算功率谱, 通过功率谱值大小, 确定地脉动信号强度最大的频率范围, 从而确定带通滤波的上下限频率。AXX 台计算结果功率谱最大频率范围是 0.01 ~ 0.15 Hz (图 2i ~ 2)。

## 2 计算应变场原理

### 2.1 信号衰减参数 $k$

为了推估研究区域内无观测站点的地脉动速

度值的强弱, 首先确定拟合量在整个区域的相关距离  $S$ 。用研究区域内已有的观测台站间空间距离分布情况, 确定高斯型经验协方差函数:

$$f(d) = f(0)e^{-k^2 d^2}. \quad (1)$$

其中,  $d$  为距观测点的距离。式 (1) 决定观测信号衰减参数  $k$  为

$$k = \min_k \{e^{-k^2 S^2} \leq 10^{-3}\}. \quad (2)$$

设  $d_{ij} = 1, 2, \dots, m_0$  为任意两点间距离, 分别定义为最小相邻观测点距离, 平均相邻观测点距离, 最大相邻观测点距, 最大观测点距离为

$$\begin{aligned} d_{\min} &= \min_i \{ \min_j d_{ij} \}; \quad \bar{d} = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} \{ \min_j d_{ij} \}; \\ d_{\max} &= \max_i \{ \min_j d_{ij} \}; \quad D_{\max} = \max_i \{ \max_j d_{ij} \}. \end{aligned} \quad (3)$$

因此,  $S$  可取为

$$S \in \left( \max \{ 1.2d_{\max}, 4\bar{d}, 0.2D_{\max} \}, \max \{ 1.5d_{\max}, 4\bar{d}, 0.25D_{\max} \} \right), \text{ 且 } S \leq 0.5D_{\max}. \quad (4)$$

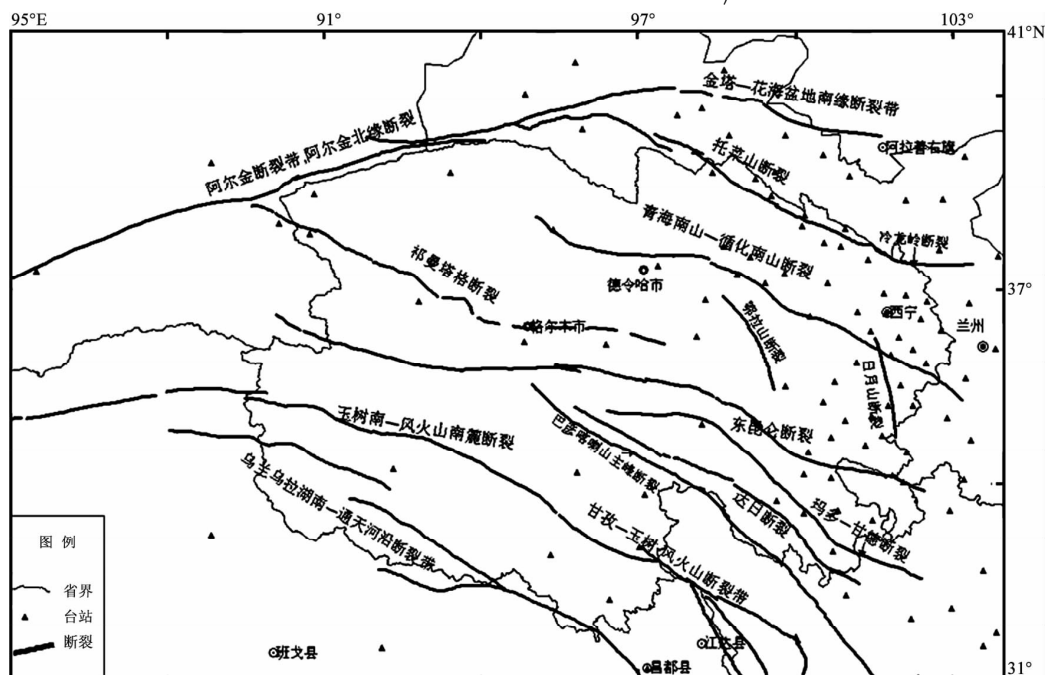


图 1 地震台站及主要断裂空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of seismic stations and main faults

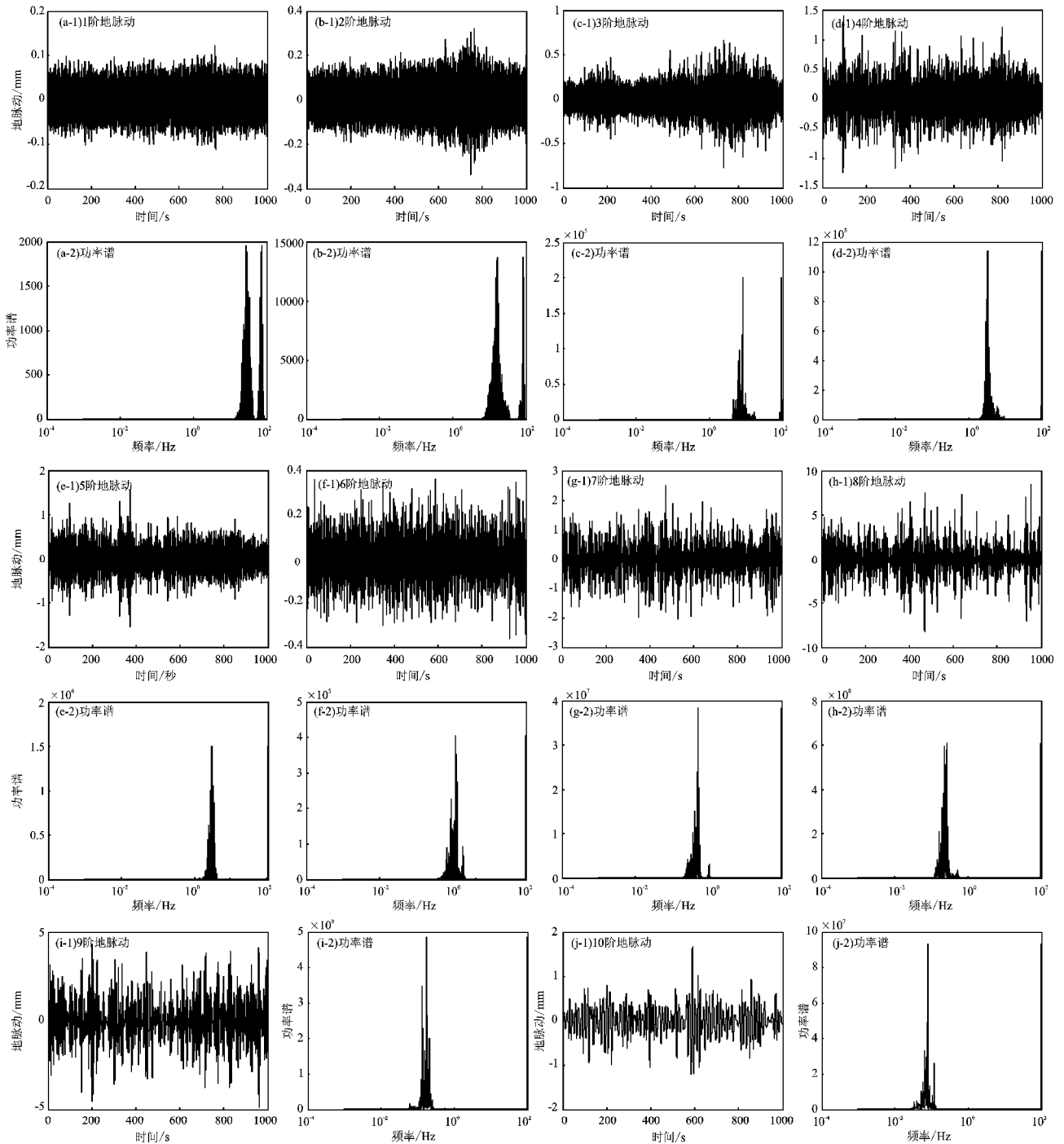


图 2 AXX 台小波分析分解数据及相应功率谱

Fig. 2 Decomposition data of wavelet analysis of the recording of AXX Station and the corresponding power spectrum

## 2.2 应变场空间分布的计算方法

利用前述方法,通过建立水平运动速度值协方差函数,借助位移与应变的偏导关系(张希,江在森,1998,1999;江在森,刘经南,2010;柴洪洲,2006;阿提内·约克塞尔,2001)获取水平应变场分布,为减小由于坐标变换而带来的理论误差,需要考虑站点所在经纬线方向(表示正 EW

和 NS)与投影平面直角坐标 X、Y 轴向的偏差角。应变值计算公式为(张希,江在森,1998,1999)

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x'}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y'}. \quad (5)$$

面膨胀

$$\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y. \quad (6)$$

其中,  $u$ 、 $v$  分别为每个站点的速度 (位移)。

### 3 水平应变空间分布分析

通过小波分析分解观测数据, 运用经验协方差函数, 得到网格化 ( $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ ) 地脉动位移空间相关的水平位移场, 再利用面膨胀计算公式得到水平应变空间分布。按时间先后为序, 给出门源 6.4 级地震前 20 d (每天 00 时) (图 4) 和震前 14 h (图 5) 青海及周边区域应变场时间、空间和强度的演化进程。震前 20 d 时间演化进程总体分为 2 个阶段: 第一个阶段为 2016 年 1 月 1 ~ 14 日; 第二个阶段为 2016 年 1 月 15 ~ 21 日。第一阶段应变场空间分布特征主要表现为张性 (红色) 与压性 (蓝色) 区域四象限或相间分布, 且主要集中分布在青海北部和东南部, 青海西南部应变

仅有一些微弱的变化。高应变梯度带和四象限张压相间应变场出现频率较高的区域主要集中在青海及周边区域二级活动块体 (张培震等, 2003) 边界带上的阿尔金断裂带、祁连断裂带、东昆仑断裂带以及玉树甘孜断裂带在青川两省交界的东段 (图 3a, 图 4)。

2016 年门源 6.4 级地震震中位于 GPS 给出的应变梯度带附近, 表明中长期应变场在地震前有一定的前兆反映 (图 3a)。对比图 3a, b 可以看出, 研究区内大部分 6 级以上地震与主要断裂空间分布 (张培震等, 2003) 和应变场梯度变化分布基本一致。地脉动解算的应变场空间分布格局反映研究区域内短期地壳应变场的活动特征, 其反映出高应变值在空间上的变化特征与使用中国地震局第一形变测量中心给出的 GPS 速度场解算的中长期应变场 (图 3a)、应变梯度带空间较为一致,

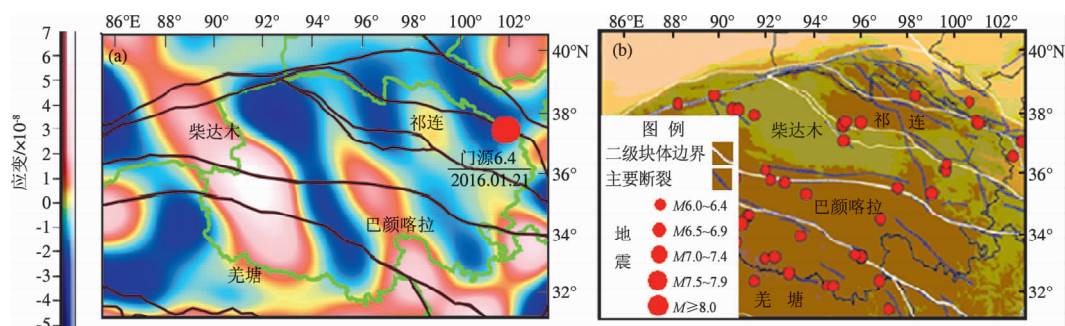
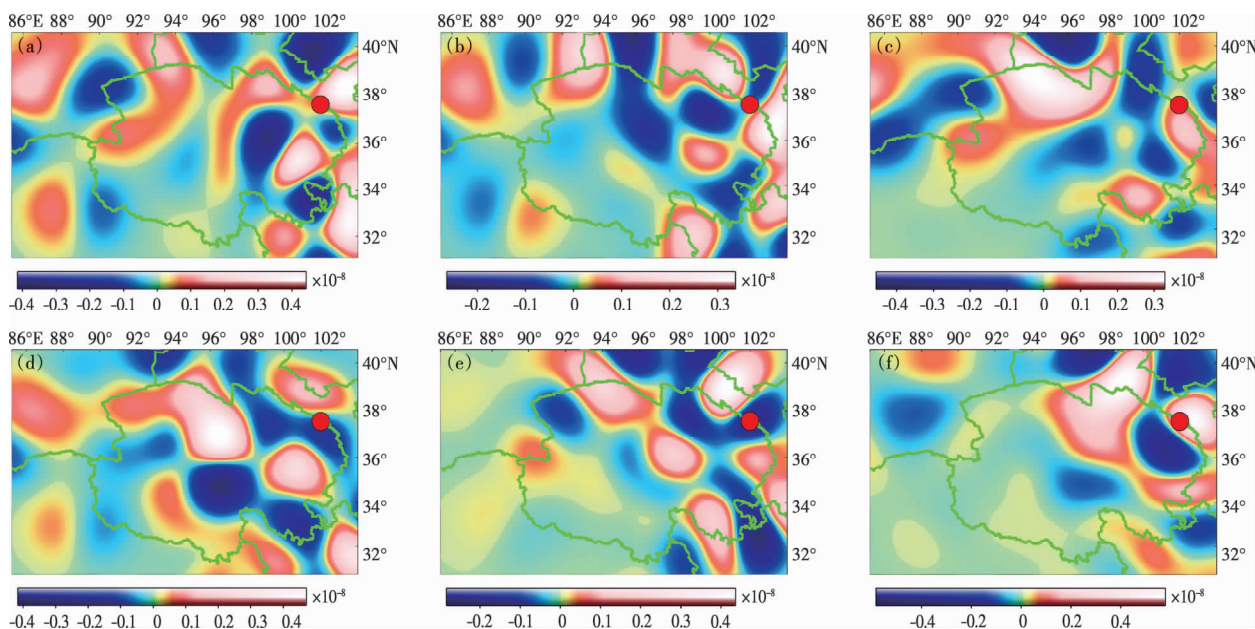


图 3 2013 ~ 2015 年 GPS 资料得到应变场 (a) 和二级活动块体及主要断层空间分布 (b)

Fig. 3 Strain field obtained by GPS data between 2013 and 2015 (a) and spatial distribution of two level active blocks and main faults





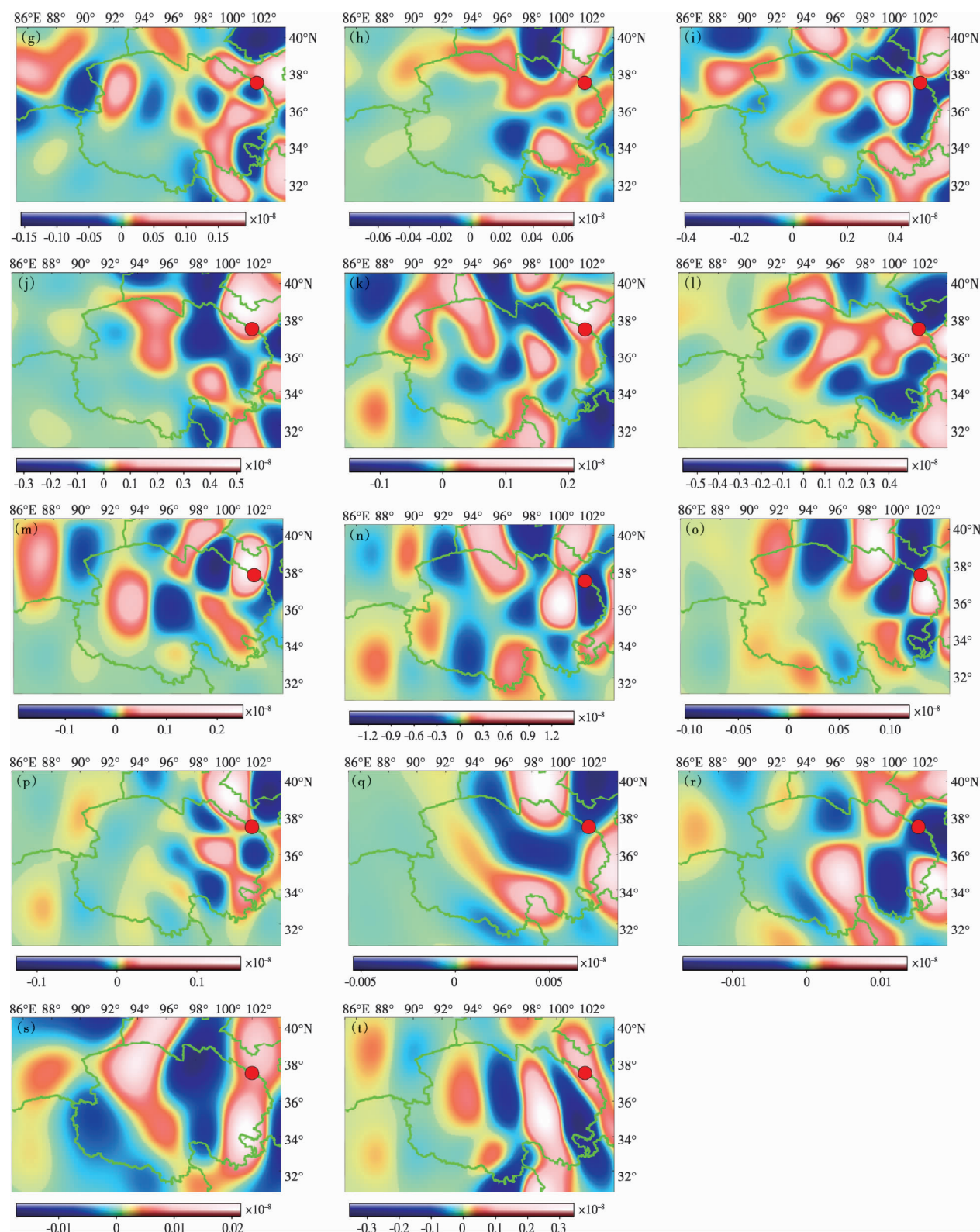


图 4 2016 年 1 月 1 ~ 20 日每天 00 时应变场空间分布

(a) 1 月 1 日; (b) 1 月 2 日; (c) 1 月 3 日; (d) 1 月 4 日; (e) 1 月 5 日; (f) 1 月 6 日; (g) 1 月 7 日; (h) 1 月 8 日;  
 (i) 1 月 9 日; (j) 1 月 10 日; (k) 1 月 11 日; (l) 1 月 12 日; (m) 1 月 13 日; (n) 1 月 14 日; (o) 1 月 15 日;  
 (p) 1 月 16 日; (q) 1 月 17 日; (r) 1 月 18 日; (s) 1 月 19 日; (t) 1 月 20 日

Fig. 4 Spatial distribution of strain field at 00 a. m. from Jan. 1 to Jan. 20, 2016

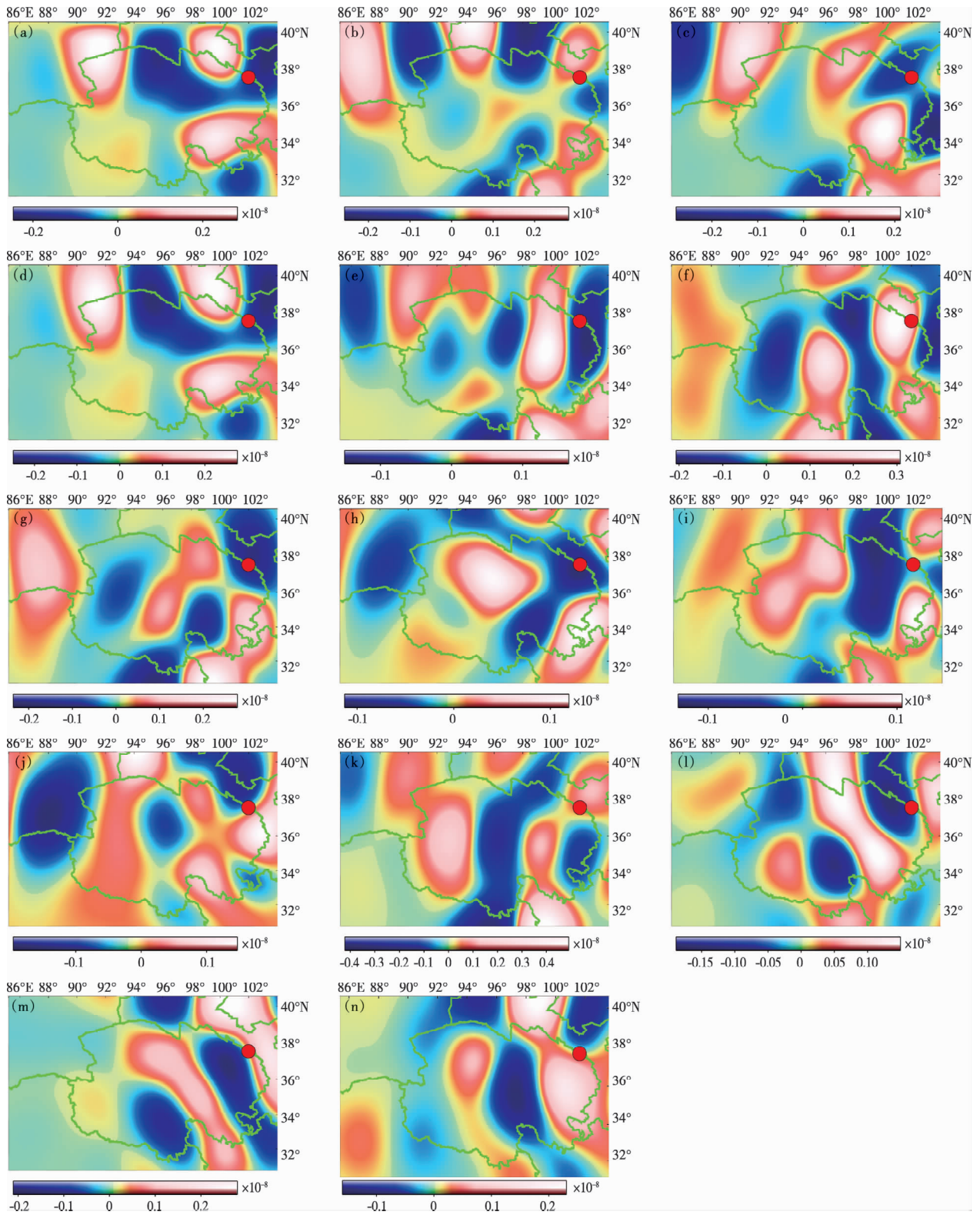


图5 2016年1月20日11时~21日00时整点应变场空间分布

(a) 1月20日11时; (b) 1月20日12时; (c) 1月20日13时; (d) 1月20日14时; (e) 1月20日15时;  
 (f) 1月20日16时; (g) 1月20日17时; (h) 1月20日18时; (i) 1月20日19时; (j) 1月20日20时;  
 (k) 1月20日21时; (l) 1月20日22时; (m) 1月20日23时; (n) 1月21日00时

Fig. 5 Spatial distribution of hour strain field from 11 a. m. on Jan. 20 to 00 a. m. on Jan. 21, 2016

即地脉动所得出的应变场异常空间分布与中长期(活断裂和 GPS 资料)所指示的地震孕震区在空间上有一定的相关性。在第一阶段, 门源 6.4 级地震震中附近应变场在空间上分布有张压相间的四象限分布的特征, 且应变最大值的区域始终在震中附近。从图 4a~m 可以看出, 1 月 1~13 日, 研究区域内的应变强度虽有起伏波动, 但变化不大; 1 月 14 日研究区域内应变强度升高达到最大值(图 4n), 升高幅度达到背景值的 4 倍(图 6), 此时为门源地震前 6 天。第二阶段, 1 月 15~20 日, 研究区内高应变梯度带进一步向震中附近收缩, 且四象限分布更为明显(图 4o~t)。从图 5 可以看出, 门源 6.4 级地震前 14 h 的应变场空分布, 结果显示应变强度略有回升, 高应变梯度带主要集中在震中附近。门源地震区域应变场强度在时间进程上特征, 表现为 2015 年 1 月 1~13 日研究区域内应变场强度变化较为平缓且应变场强度较低, 1 月 14 日应变场强度突然升高, 达到背景值 4 倍, 1 月 15~21 日应变场强度逐步降低至震前水平(图 6)。

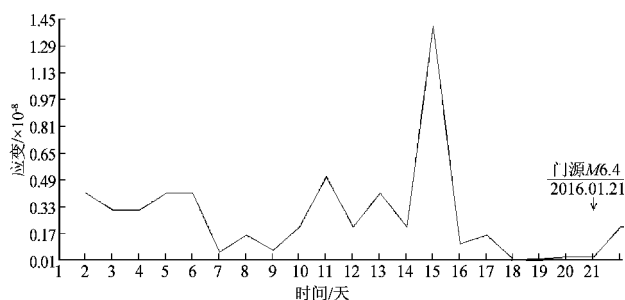


图 6 2016 年 1 月 1~21 日应变强度时间序列

Fig. 6 Time series of strain intensity from Jan. 1 to Jan. 21, 2016

## 4 讨论

本文通过小波分析提取青海区域数字地震台网记录的地脉动观测资料低频信号, 计算门源 6.4 级地震震前 20 d 地壳应变场。从区域应变场空间分布、应变场强度随时间变化特征, 分析门源 6.4 级地震震前兆异常特点。从区域应变场的角度, 总结对该地震的发震地点和发震时间的短期预测方法。研究结果显示, 对门源 6.4 地震震前发震地点的判定, 在应变场空间上表现为在震中附近出现

张压相间应变梯度带, 而且张性与压性区域的应变强度大致相当。这一结果与陈颢等(1984)利用脉冲激光全息干涉术研究岩石受压破裂过程所观测到的岩石变形特征一致; 马瑾等(1995)在研究演示受压过程中, 应变场也有类似的张压相间四象限分布特征。发震时间的判定在应变强度随时间进程上表现为, 随着发震时刻的临近, 区域应变场在震前 6 d 左右升高, 大约是背景值的 4 倍, 随后恢复到高值前的变化水平。

利用区域数字地震台网地脉动观测资料计算得到的区域应变场, 其高应变梯度带在空间分布上与 GPS 资料给出的中长期应变场基本一致, 其张压性有时也不一致, 这可能与两种观测资料所反映的地壳运动周不同有关, 这方面的问题还有待于做进一步研究。

本文利用相对于其它形变观测资料, 在时间上连续性好、采样率高、台网分布密相对度较高的区域数字地震台网地脉动观测资料获取应变场, 是对 GPS 观测资料获取应变场的有益补充, 对跟踪判定中强地震发震地点和发震时间具有一定意义。

## 参考文献:

- 阿提内·约克塞尔. 2001. 地表形变分析理论[M]. 北京:地震出版社.
- 柴洪洲. 2006. 地壳运动背景场及其监测网数据处理理论与方法研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 55-65.
- 陈颢, 郑捷, 郭继光等. 1984. 脉冲激光全息干涉术在岩石力学研究中的应用[J]. 科学通报, 29(10): 609-609.
- 戴黎明, 李三忠, 陶春辉等. 2010. 俯冲带耦合作用对苏门答腊地区应变场影响的三维数值模拟[J]. 地球物理学报, 53(8): 1837-1851.
- 江在森, 刘经南. 2010. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法[J]. 地球物理学报, 53(5): 1109-1117.
- 江在森, 马宗晋, 牛安福等. 2003a. GPS 技术应用于中国地壳运动研究的方法及初步结果[J]. 地学前缘, 10(1): 71-79.
- 江在森, 马宗晋, 张希等. 2003b. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 46(3): 352-358.
- 江在森, 杨国华, 丁平等. 2008. 区域形变时空特征及其与强震关系研究[M]//流动形变监测系统(下册). 北京:地震出版社, 26-40.
- 江在森, 杨国华, 王敏等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 1-9.
- 江在森, 张希, 陈兵等. 2000. 华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征[J]. 地球物理学报, 43(5): 657-665.
- 江在森, 张希, 崔笃信等. 2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变



- 形[J]. 地球物理学报, 44(5): 636–644.
- 江在森, 张希, 祝意青等. 2003c. 昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震前区域构造变形背景[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊1): 163–172.
- 马瑾, 刘力强, 马胜利等. 1995. 复杂构造应力扰动场与发震构造识别问题的研究[J]. 地震地质, 17(4): 372–382.
- 马瑾, 张渤涛, 袁淑荣. 1979. 断层闭锁区附近应变场演化的初步探讨[J]. 地震地质, 1(3): 47–54.
- 王琪, 赖锡安, 游新兆等. 1998. 红河断裂的 GPS 监测与现代构造应力场[J]. 地壳形变与地震, 18(2): 49–56.
- 张培震, 邓起东, 张国民等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学, 33(增刊1): 12–13.
- 张希, 江在森. 1998. 借助最小二乘配置整体解算地壳视应变场[J]. 地壳形变与地震, 18(2): 32–39.
- 张希, 江在森. 1999. 用最小二乘配置获得地形应变场动态图像的几个问题研究[J]. 地壳形变与地震, 19(3): 57–62.

## A Preliminary Study on the Precursor Anomaly Characteristics of Microtremor Strain of Qinghai Menyuan $M_s 6.4$ Earthquake in 2016

ZHANG Xiaoqing, YUAN Fuquan, YU Na

(*Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

### Abstract

On the basis of the microtremor observation data in Qinghai Regional Digital Network, we studied and analyzed the regional stress field in Qinghai and its adjacent area, and summarized spatial and temporal evolution characteristics of strain field before Menyuan  $M_s 6.4$  earthquake on Jan. 21, 2016. The results indicate that: the spatial distribution of regional strain field showed the strain gradient zone of tension and compression near the epicenter before the earthquake, and the strength of strains were roughly equivalent in tension and compression areas. The strain intensity in the time process showed that as the time of earthquake was approaching, the regional strain intensity increased near the epicenter in about 6 days before the earthquake, and was about 4 times higher than the background value.

**Key words:** Menyuan  $M_s 6.4$  earthquake; microtremor; crustal strain field