

黄浩、付虹, 2019, 2016 年门源 6.4 级地震前视应力变化特征, 中国地震, 35(4), 616~628.

2016 年门源 6.4 级地震前视应力变化特征

黄浩¹⁾ 付虹²⁾

1) 青海省地震局, 西宁 810001

2) 云南省地震局, 昆明 650224

摘要 基于科学台阵的观测资料, 计算了 2016 年门源 6.4 级地震前约 2 年震源区 80km 范围内 105 次 $1.5 \leq M_L \leq 3.3$ 地震的视应力。结果显示, 研究区域 2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日的地震视应力明显高于 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日, 视应力其特征表现为震前 1 年明显升高—明显降低—临震前 2 个月小幅升高, 2 个时段扣除震级影响的规范化视应力对比表明, 震前 1 年研究区域应力水平相对升高, 规范化视应力空间分布图像显示, 皇城-双塔断裂附近存在显著高值异常区, 距离震中约 48km。视应力异常、平安水位和乐都气氡破年变异常表明, 研究区域附近震前应力水平较高, 与 2016 年门源 6.4 级地震前震源区应力场增强存在较好的对应关系, 是 1 次测震和前兆异常显著的震例。视应力异常可在较长时间显示高应力水平状态和异常地点, 前兆破年变异常可以从时间紧迫性给出判断, 因此, 结合可信度较高的测震和前兆异常可以给出一定程度的地震预测。

关键词: 门源地震 视应力 科学台阵

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0616-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2016 年 1 月 21 日 01 时 13 分, 青海省海北藏族自治州门源县发生 6.4 级地震, 震中位置 (37.7°N , 101.6°E), 震源深度 10km (以下简称门源地震)。门源地震震中位于青藏高原东北缘冷龙岭断裂北侧, 距离 1927 年古浪 8.0 级地震震中约 55km, 是继 1986 年门源 6.5 级地震之后该区域发生的又一次破坏性地震。

门源地震前跟踪的短临前兆异常仅有 5 项, 均为定点形变或地下流体显著异常变化 (马玉虎等, 2017), 而震后的研究则发现更多短期异常。陈为涛等 (2017) 基于震前 GPS 时间序列研究表明, 2010 年以来发震区域一直处于应变的挤压缩减状态, 震前 2~3 个月出现可能为临界破裂状态的非线性调整。冯蔚 (2016) 通过对垂直于门源地震发震断层面的 3 个 GPS 台站时间序列研究发现, 震前 55 天 3 个台站东北方向的运动幅度增强, 与门源地震 NW 向断层逆冲破裂的构造动力作用方向一致, 显示门源地震前震源区构造应力场存在应力增强

[收稿日期] 2019-04-22; [修定日期] 2019-11-01

[项目类别] 青海省地震科学基金 (2019B05)、青海省地震科学基金 (2016A01)、中国地震局震情跟踪定向工作任务 (2020010118) 共同资助

[作者简介] 黄浩, 男, 1987 年生, 助理研究员, 主要从事地震活动性工作。E-mail: hh175@sina.com

付虹, 通讯作者, 女, 1963 年生, 研究员, 主要从事地震预报研究。E-mail: ynfuhong@qq.com

的现象。左可桢等(2018)研究发现震源区的应力降在震前半年左右出现 2 次高值异常,与门源地震有一定对应关系。张元生等(2017)和邹锐等(2018)基于祁连山主动源观测资料的 Pg 和 Sg 震相走时分析,发现门源地震前约 6 个月震源区的地壳速度发生了改变,可能与区域应力积累间存在一定的关系。

前人研究结果表明,门源地震前 2~6 个月震源区存在应力增强现象。诸多学者采用视应力研究中强地震前的应力增强现象,秦嘉政等(2006)对云南地区地震视应力的研究发现,大姚 6.2 级地震主震前,视应力出现了达到 5 倍平均值的高值变化,主震及附近地区具有相对较高的视应力;郑建常等(2006)研究了 2004 年 11 月 $M_L 4.1$ 地震前 $1.0 \leq M_L \leq 1.9$ 地震的视应力演化过程,结果显示 $M_L 4.1$ 地震前应力增强变化不明显;陈学忠等(2007)研究了 2006 年 7 月 4 日河北文安 5.1 级地震前震区形成的 $M_L 1.5$ 地震空区的视应力,发现空区的形成伴随着应力增强的过程,这一发现可能具有预测意义;刘红桂等(2007)研究了 1999 年 7 月~2005 年 4 月云南地区 1020 次中小地震的视应力,认为云南地区的地震视应力具有较好的预测意义,中小地震的视应力超过 0.9MPa 时可作为预测中强地震的 1 个参考指标;易桂喜等(2011)对 2008 年汶川 8.0 地震前龙门山-岷山构造带地震视应力和地震活动性参数的研究表明,龙门山断裂带南西段的应力积累水平明显低于中-北段,可能与汶川主震破裂沿断裂带中-北段呈 NE 向单侧扩展有关;李艳娥等(2012)的研究结果也表明,汶川 8.0 级地震前 5 年,震区的应力显示了清晰的上升—下降过程,且在临震前有一定幅度的上升;陈丽娟等(2017)对 2017 年四川九寨沟 7.0 级地震前甘南地区视应力研究结果表明,距离震中较近的舟曲和文县等地存在视应力高值异常,视应力随时间演化表现为“震前几年长时间升高—临震前几个月下降”;彭关灵等(2018)研究 2018 年云南通海 5.0 级地震前视应力后发现,震前 15.6 个月、距离震中约 46km 出现视应力高值异常区域。

为了进一步研究门源地震前震源区的应力增强现象,本文使用中国地震科学台阵探测项目的观测资料,计算门源地震前约 2 年震源区的地震视应力,分析震源区地震视应力时空演化特征及门源 6.4 级地震前是否存在视应力异常,通过可信度高的视应力异常和前兆异常分析门源 6.4 级地震前应力增强现象,探讨通过结合测震学异常和前兆异常的不同优势来预测地震的可能。

1 资料选取

本文使用中国地震科学台阵第二期在青海和甘肃布设的流动地震台阵所观测到的小震波形资料,研究观测时间段为 2014 年 3 月~2016 年 1 月,共涉及流动台站 38 个,收集到 190 次 $M_L \geq 1.5$ 地震事件(图 1),其中 $1.5 \leq M_L \leq 1.9$ 地震 102 次、 $2.0 \leq M_L \leq 2.9$ 地震 81 次、 $3.0 \leq M_L \leq 3.9$ 地震 7 次。研究区数据采集使用地震计型号为 CMG-3T(120s),数采型号为 Reftek130-B,采样率为 100Hz。

图 2 为流动地震台阵观测 2015 年 11 月 18 日甘肃天祝 $M_L 1.5$ 地震(发震时刻:2015 年 11 月 18 日 06 时 33 分 04 秒,震中位置:37.48°N,102.71°E,震源深度 7km)的垂直向波形,62024 台、62025 台、63012 台和 62030 台的震中距分别为 16km、31km、56km 和 66km,为了展示波形细节特征,选取了各台 P 波初至前 1s 至后 9s 的波形,可以看出本次 $M_L 1.5$ 地震信噪比高、震相记录清晰,表明本文使用的地震事件的波形质量满足视应力研究的需要。

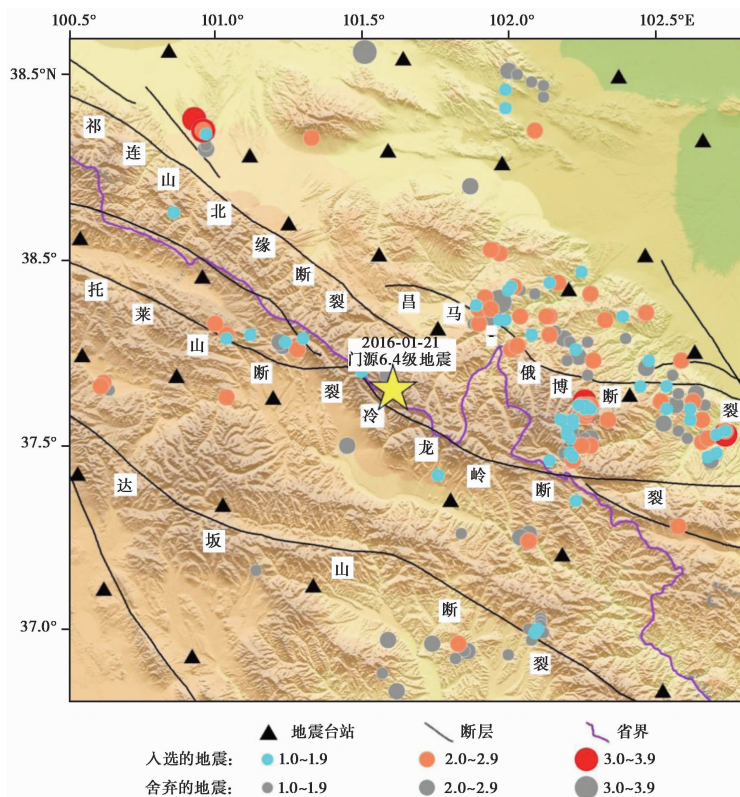


图 1 中国科学台阵的台站及其记录的 $M_L \geq 1.5$ 地震分布 (2014-03~2016-01)

彩色实心圆代表视应力计算结果符合筛选原则的 105 次地震;灰色实心圆代表视应力计算结果不符合筛选原则的 85 次地震

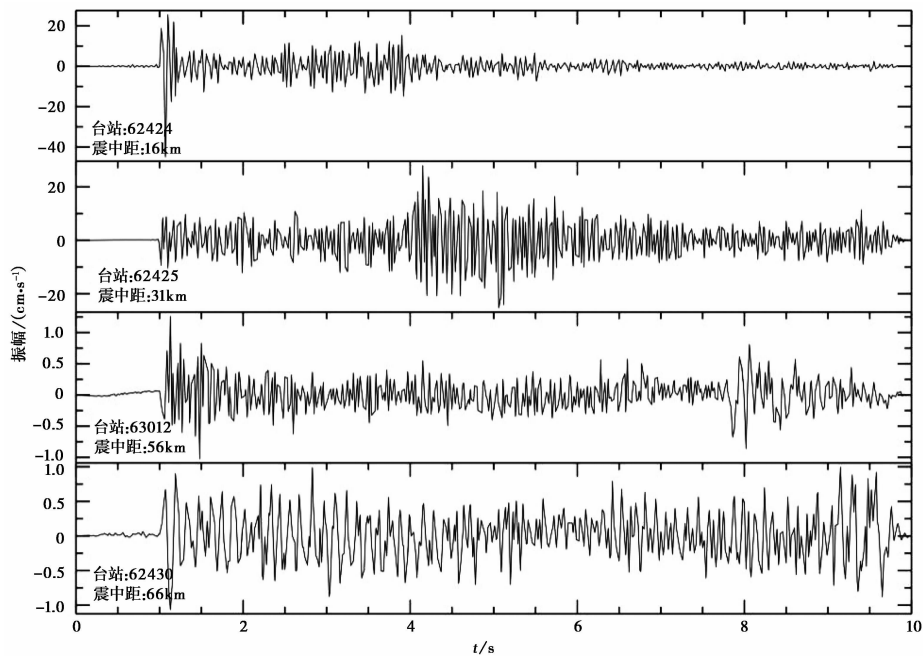


图 2 2015 年 11 月 18 日甘肃天祝 $M_L 1.5$ 地震的垂直向波形

2 方法

在弹性力学框架下,原则上是不可能由地震资料得到应力大小的。然而在一些合理假设的前提下,可由地震资料得到关于应力大小的某种有物理意义的估计,如视应力(Wyss et al, 1968; Wyss, 1970),视应力与引起地震滑动的平均应力水平之间,可通过地震波辐射效率建立联系,这一概念近年来已得到越来越多的野外实验和观测结果的证实(McGarr, 1999)。

地震视应力 σ_{app} (Wyss et al, 1968) 是表征震源区应力水平的物理量,地震视应力可作为区域绝对应力水平的下限估计(吴忠良等, 2002),其定义为

$$\sigma_{\text{app}} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

式中, E_s 为地震波辐射能量; M_0 为地震矩; μ 为震源区介质剪切模量,通常取 $3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

利用波形数据计算地震能量和地震矩时,首先将波形数据进行去倾处理,然后进行傅立叶变换得到观测谱。在近震源条件下,震源距较小,可以忽略非弹性衰减的影响,通过仪器响应和几何扩散校正得到震源谱。若忽略非弹性衰减,震源谱可以表示为(Jimenez et al, 2005)

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^4}} \quad (2)$$

式中, Ω_0 为震源谱零频极限值, f_c 为拐角频率。由 Ω_0 和 f_c 确定震源谱的具体方法参考相关文献(陈学忠等, 2007)。

地震矩 M_0 可以根据下式求得(Brune, 1970)

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0 d}{R} \quad (3)$$

式中, ρ 为地壳介质密度(取 2.71 g/cm^3); v 为波速(S波取 3.5 km/s); d 为震源距; R 为辐射因子,可用均方根代替(S波取为 0.63)(Aki et al, 1980)。

地震辐射能量可由对速度谱的平方积分求得(Andrews, 1986)

$$E_s = 8\pi\rho v \int_0^\infty V(f)^2 df \quad (4)$$

式中, $V(f)$ 为速度谱。根据上述方法,得到每个台站的地震矩 M_0 、地震波辐射能量 E_s ,即可根据式(1)对各台站视应力求平均,并消除个别台站的异常高值对平均值的影响(Archuleta et al, 1982),最终得到地震视应力。

3 计算结果及时空特征

在研究区域记录到了大量高质量的观测资料,为了保证计算结果的稳定性和准确性,计算时按照以下原则对数据进行了严格的筛选:台站震中距小于 80 km 、波形信噪比高、震相清晰、震源谱频谱特征符合 Brune 模型的台站数据。按照上述原则计算了 190 次地震视应力,

选择至少 4 个台站参与计算的事件,最终获得了 105 次中小地震的视应力。

3.1 视应力时间特征

视应力在不同时段存在明显差别,即 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日的视应力显著低于 2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日(图 3、4)。视应力与震级存在一定的相关性,为了分辨不同震级对视应力差异的影响,将视应力划分为 2 个时段为震级与视应力进行拟合。

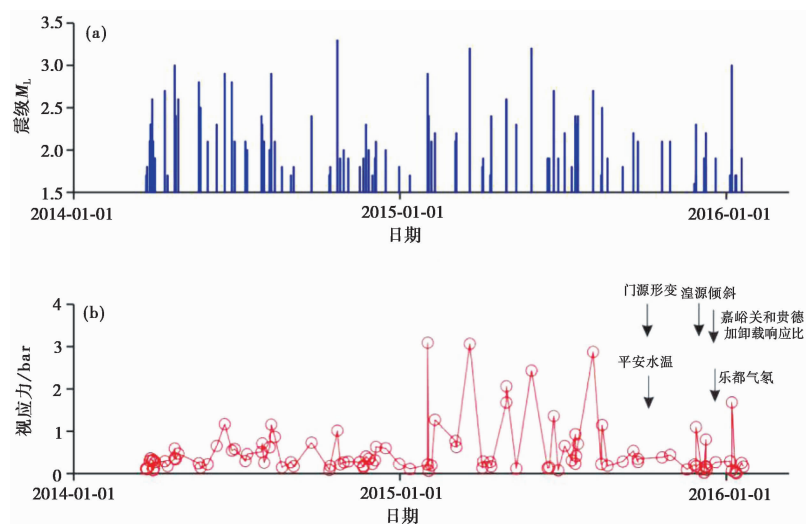


图 3 选取资料 $M-T$ (a) 和视应力时序图(b)

黑色箭头为门源地震前的 5 项前兆异常

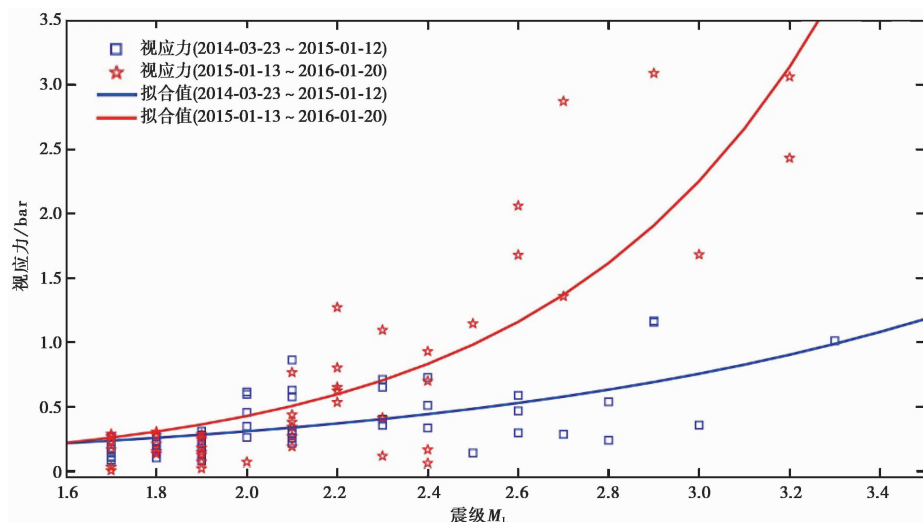


图 4 不同时段视应力与震级的关系

采用指数逼近来拟合震级与视应力之间的关系, 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日的震级-视应力拟合关系为

$$\sigma_{\text{app}} = 0.05209 \cdot e^{(0.892 \cdot M_L)} \quad (5)$$

$$R\text{-square} = 0.39, \text{RMSE} = 0.21$$

2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日的震级-视应力拟合关系为

$$\sigma_{\text{app}} = 0.01553 \cdot e^{(1.659 \cdot M_L)} \quad (6)$$

$$R\text{-square} = 0.74, \text{RMSE} = 0.40$$

式中, $R\text{-square}$ (确定系数)通过数据的变化来表征拟合的好坏, 正常取值范围为 $[0, 1]$, $R\text{-square}$ 越接近 1, 表明模型对数据拟合越好; RMSE 为均方根误差。

2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日视应力的 $R\text{-square}$ 不够理想, 原因为多次 $2.0 \leq M_L \leq 2.4$ 地震视应力明显高于拟合关系, 经数据检查和多次重复计算, 确认这些地震的视应力可靠; 2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日的视应力拟合曲线显著高于 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日(图 4), 表明门源 6.4 级地震前 1 年研究区域的视应力显著高于震前 1 年 9 个月至震前 1 年。2 个时段的均方根误差分别为 0.21 和 0.40, 显示 2 个时段视应力的离散值较小, 具有较好的误差水平。

此外, 门源倾斜、平安水温、湟源倾斜、嘉峪关与贵德加卸载响应比和乐都气氦等 5 项短临前兆异常出现在门源地震前 7 个月至震前 1 个月的时段内, 可以看出视应力整体相对增强的时间早于 6 项前兆异常出现的时间(图 3(b)), 震前 1 个月内视应力的相对增强和湟源倾斜、嘉峪关与贵德加卸载响应比和乐都气氦等 3 项, 前兆异常显示较同步变化, 表明门源 6.4 级地震前测震学异常和前兆异常的时间演化特征呈同步性。

3.2 视应力空间特征

为了在一定程度上减小震级对视应力的影响, 动态地讨论视应力空间异常分布特征, 将 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日的震级-视应力拟合关系做为背景值 ($\sigma_{\text{app}} = 0.05209 \cdot e^{(0.892 \cdot M_L)}$), 将 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日和 2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日的视应力减去背景值, 得到基于相同背景值的 2 个时段的规范化视应力。规范化视应力的空间分布显示(图 5), 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日空间上的异常不明显; 2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日视应力存在 2 个明显的高值异常区, 分别位于甘肃南皇城-双塔断裂附近和青海门源苏吉滩乡达坂山断裂-托莱山断裂之间。

4 前兆异常分析

震例研究表明, 门源水平和垂直摆倾斜、湟源钻孔倾斜、德令哈水温、平安静水位、乐都逸出气氦和嘉峪关及贵德地磁加卸载响应比在 2016 年门源 6.4 级地震前存在短临变化(马玉虎等, 2017)。前兆异常空间分布范围相对本文研究区域较大, 仅门源倾斜位于本文研究区域内(图 6)。为了更全面地分析 2016 年门源 6.4 级地震的前兆异常, 简要介绍上述前兆异常变化情况。

4.1 门源倾斜

门源钻孔应变观测和门源水平摆倾斜和垂直摆倾斜距离 2016 年门源 6.4 级地震最近, 仅 31km, 门源钻孔应变观测自 2012 年 7 月 10 日开始快速压性变化, 2012 年 10 月转折压性

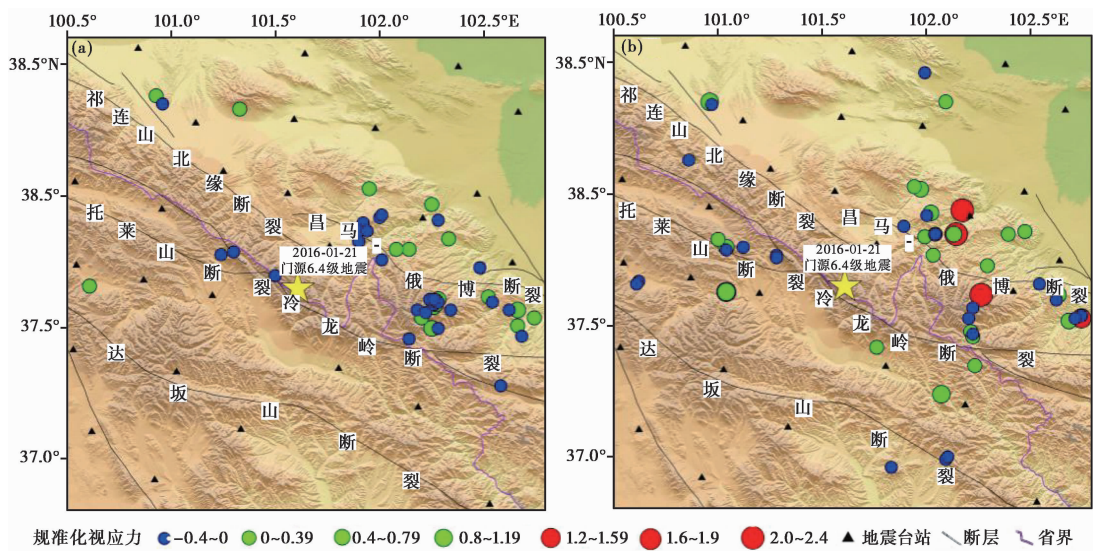


图 5 2016 年门源 6.4 级地震前规范化视应力空间分布
(a) 2014 年 3 月 23 日~2015 年 1 月 12 日;(b) 2015 年 1 月 13 日~2016 年 1 月 20 日

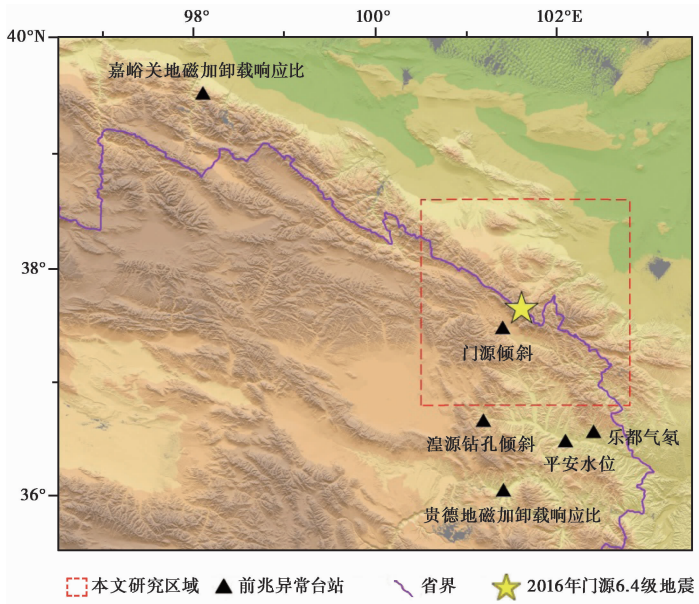


图 6 本文研究区域与 2016 年门源 6.4 级地震前兆异常分布

速率明显减缓,2015 年 8 月 20 日再次出现加速压性变化,呈现长期呈压性变化趋势。

在门源钻孔应变呈现挤压变化的长期背景下,同台观测的门源水平摆倾斜和垂直摆倾斜于 2015 年 8 月 18 日出现转折变化,其中,水平摆倾斜 NS 向呈北倾、EW 向呈东倾,垂直摆倾斜 NS 向呈南倾、EW 向呈东倾,8 月 27 日后均回返,2016 年 1 月 21 日发生门源 6.4 级地震,同步转折变化出现在震前 5 个月左右(图 7、8)。

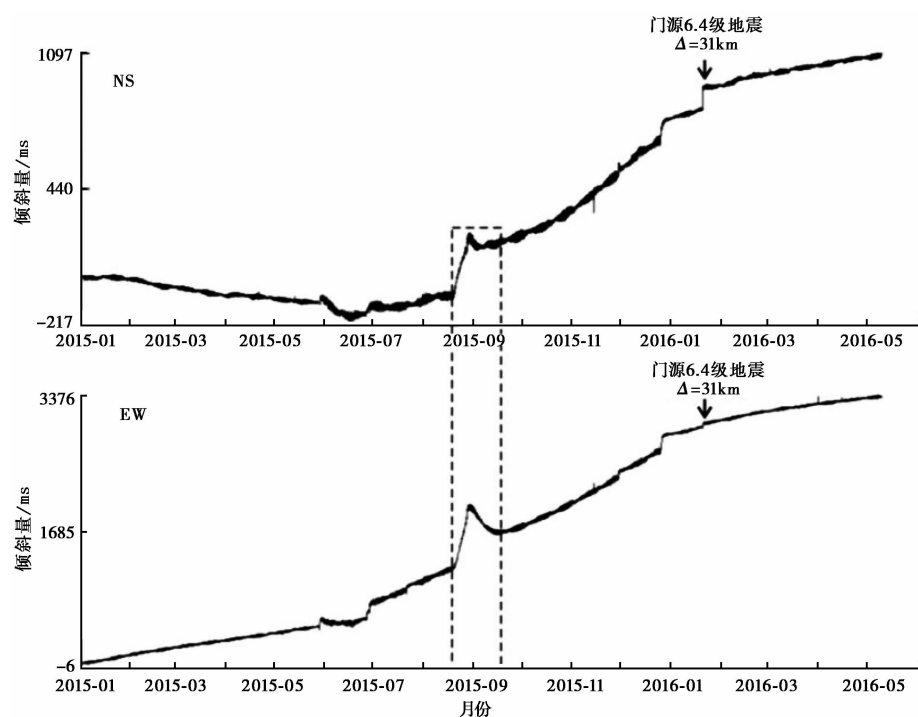


图 7 门源水平摆倾斜整点值曲线

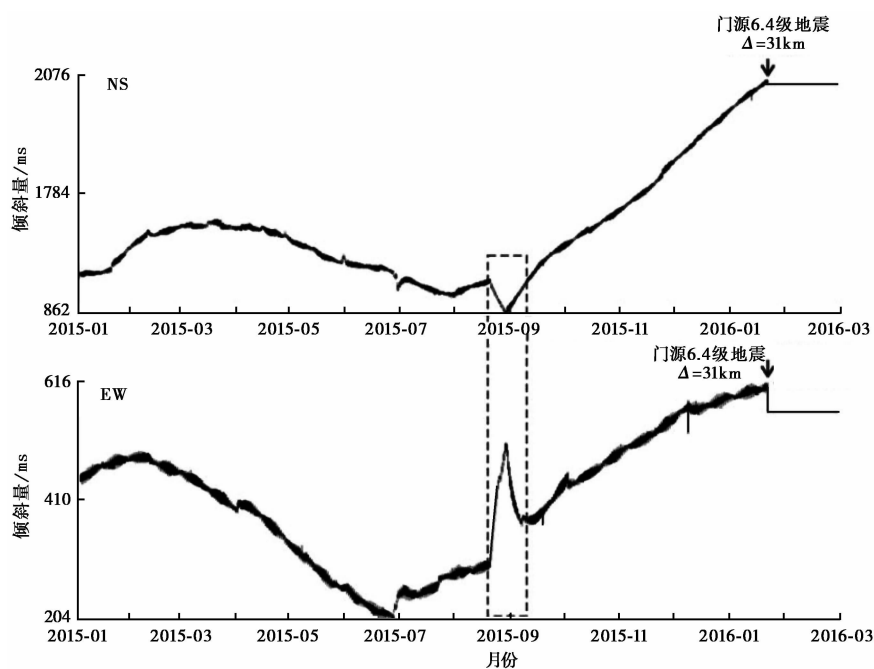


图 8 门源水垂直摆倾斜整点值曲线

4.2 湟源钻孔倾斜

湟源钻孔倾斜观测距震中 130km,2015 年 11 月 NS 向呈较为显著的转折变化,12 月中旬出现显著的南倾尖点变化,之后呈现大幅度的北倾变化(图 9),直至 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震发生,该异常具有短临性质。

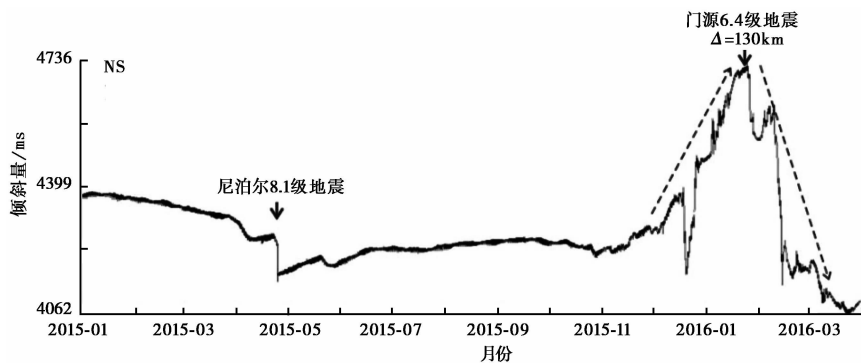


图 9 湟源钻孔倾斜整点值曲线

4.3 平安静水位

平安静水位距震中 128km,2014 年平安静水位呈较为完整的年变形态,2015 年 9 月 23 日静水位打破原来下降趋势,出现破年变异常,2016 年 1 月 21 日发生门源 6.4 级地震。震后测值出现转折下降,与往年同期趋势相同(图 10)。

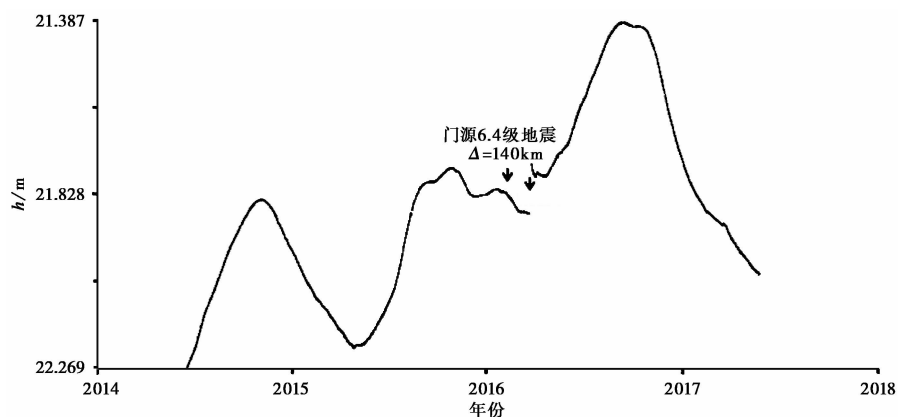


图 10 平安静水位整点值曲线

4.4 乐都逸出气氡

乐都逸出气氡距震中 140km,2015 年 12 月 16 日气氡浓度打破正常年变形态迅速上升,持续至 2016 年 12 月 21 日;此后约 20 天内气氡浓度观测值呈下降—转折—上升变化,并于 1 月 9 日达到最高值涨幅约 150Bq/L;观测峰值出现约 11 天后发生了门源 6.4 级地震;震后第二天观测值开始下降(图 11)。

4.5 地磁加卸载响应比

门源 6.4 级地震前地磁加卸载响应比成组出现超限的高值(图 12),且异常高值的空间

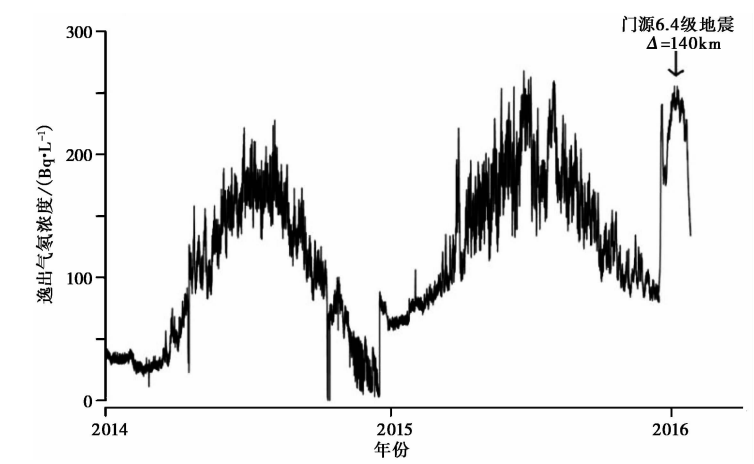


图 11 乐都逸出气氢整点值曲线

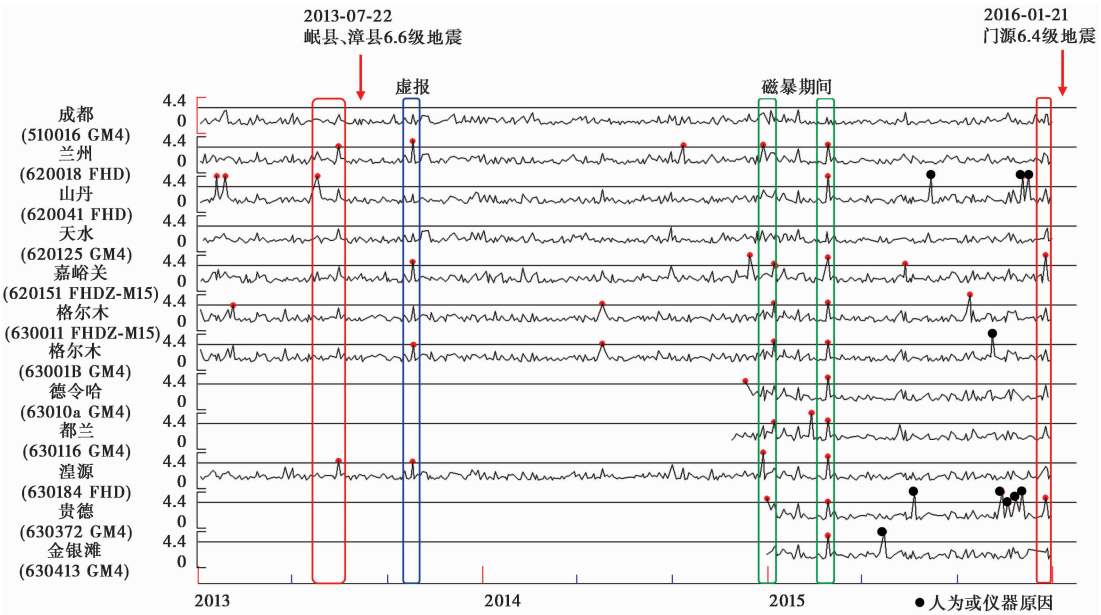


图 12 加卸载响应比异常图(据李霞等(2016))

阈值 3.1 红色实心圆代表加卸载响应比值超过阈值线 3.1 的高值超限异常

分布相对集中于震中区域附近,震中位于异常高、低值转换带或过渡带附近,表现出一定的时空同步性,特别是 2015 年 12 月 23 日嘉峪关和贵德的加卸载响应比值分别为 6.5、3.7,出现最大异常的嘉峪关距离震中 370km,异常出现 29 天后发生了门源 6.4 级地震(李霞等, 2016)。岷县-漳县 6.6 级地震发生前 21 天,兰州、山丹和湟源加卸载响应比曾出现过高值超限异常。

5 结论与讨论

基于科学台阵项目高密度的观测资料,计算了 2016 年门源 6.4 地震前约 2 年距震中

80km 范围内 105 次 $1.5 \leq M_L \leq 3.3$ 地震的视应力。对比分析研究区域视应力不同时间段的时空特征,获得以下结论:

(1)从视应力时间演化来看,研究区域地震视应力在门源 6.4 级地震前 1 年 9 个月至震前 1 年无明显异常,在门源 6.4 级地震前 1 年显著升高。视应力显著升高大致从 2015 年 1 月 13 日开始,不同时段拟合的震级-视应力关系清晰地显示了视应力升高的显著性;地震视应力随时间变化特征表现为,震前 1 年视应力明显升高—明显降低—临震前 2 个月小幅升高。视应力在门源 6.4 级地震前明显升高的特征与视应力在四川九寨沟 7.0 地震前长时间升高特征相同(陈丽娟等,2017),但在门源 6.4 级地震临震阶段表现为小幅升高,而在四川九寨沟 7.0 地震临震阶段表现为下降,不同地震前视应力随时间演化特征存在差异,但都存在震前长时间明显升高的特征。

(2)从视应力空间分布特征来看,甘肃肃南皇城-双塔断裂附近存在显著高值异常区。2016 年门源 6.4 级地震是青藏高原向 NE 方向推挤生长的表现,是该区域应力积累的一次局部调整。门源 6.4 级地震发震断层走向 $134^\circ \sim 143^\circ$ 、倾向 SW、运动性质以逆冲为主(雷东宁等,2018),在 NE 向主压应力推挤中发震断层下盘一侧因呈锐角更容易积累应力,因此甘肃肃南皇城-双塔断裂附近视应力高值异常区可能与门源地震的动力学环境和发震构造模式有关。

(3)2016 年门源 6.4 级地震前存在门源倾斜、湟源钻孔倾斜、德令哈水温、平安水位、乐都气氡和嘉峪关及贵德地磁加卸载响应比等短临异常,特别是平安水位和乐都气氡破年变异常对时间预测有一定判断,但异常集中分布在青海东部前兆观测密集地区,对地点预测较难判断。视应力在门源 6.4 级地震前约 1 年出现明显异常,异常区域空间位置可预测地点。

(4)视应力的时间和空间演化特征表明,研究区域的应力水平在震前 1 年得到显著增强,震前 1~3 个月平安水位和乐都气氡破年变异常也表明研究区域附近应力水平较高,这与 2016 年门源 6.4 级地震前震源区应力场增强存在较好的对应关系,是一次测震和前兆异常显著的震例。视应力异常可在较长时间显示高应力水平状态及异常区域,前兆破年变异常可以从时间紧迫时给出判断,因此结合可信度较高的测震和前兆异常可以做出一定程度的地震预测。

致谢: 中国地震局地球物理研究所李艳娥提供了视应力程序,辽宁省地震局张博和甘肃省地震局张博完善了人机交互界面并提供了指导,在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈丽娟、陈继锋、龚丽文等,2017,2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前甘肃南部地区视应力变化,中国地震,33(4), 521~531.
- 陈为涛、甘卫军、肖根如等,2017,2016 年青海门源 $M_s 6.4$ 地震前的区域地壳形变特征,大地测量与地球动力学,37(8), 777~781.
- 陈学忠、李艳娥,2007,2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_s 5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化,中国地震,23(4), 327~336.
- 冯蔚,2016,利用 GPS 资料分析震前地表位移阶段性特征,硕士学位论文,北京:中国地震局地震预测研究所.
- 雷东宁、刘杰、刘姝妹等,2018,2016 年 1 月 21 日青海门源 $M 6.4$ 地震发震构造模式,地震地质,40(1),107~120.
- 李霞、刘磊、冯丽丽,2016,2016 年青海门源 6.4 级地震前地磁异常特征分析,地震研究,39(S1),122~127.

- 李艳娥、陈学忠、王恒信, 2012, 汶川 8.0 级地震前四川地区地震视应力时空变化特征, 地震, **32**(4), 113~122.
- 刘红桂、王培玲、杨彩霞等, 2007, 地震视应力在地震预测中的应用, 地震学报, **29**(4), 437~445.
- 马玉虎、马震、杨晓霞等, 2017, 2016 年门源 6.4 级地震异常分析, 高原地震, **29**(4), 1~11.
- 彭关灵、赵小艳、刘自凤等, 2018, 2018 年云南通海 M_s 5.0 地震前视应力时空特征, 地震研究, **41**(4), 487~493.
- 秦嘉政、钱晓东, 2006, 云南地区地震视应力的时间和空间分布研究, 地震学报, **28**(3), 221~229.
- 吴忠良、黄静、林碧苍, 2002, 中国西部地震视应力的空间分布, 地震学报, **24**(3), 293~301.
- 易桂喜、闻学泽、辛华等, 2011, 2008 年汶川 M_s 8.0 地震前龙门山-岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布, 地球物理学报, **54**(6), 1490~1500.
- 张元生、王宝善、陈颢等, 2017, 两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化, 地球物理学报, **60**(10), 3815~3822.
- 郑建常、张永仙、潘元生等, 2006, 青岛崂山地区环境应力与视应力变化分析, 地震, **26**(3), 123~130.
- 邹锐、郭晓、张元生等, 2018, 利用祁连山主动源资料研究 2016 年门源 6.4 级地震前后波速变化, 中国地震, **34**(2), 283~292.
- 左可桢、陈继锋、蒲举等, 2018, 2016-01-21 青海门源 M_s 6.4 地震震前应力降变化特征研究, 大地测量与地球动力学, **38**(6), 629~633.
- Aki K, Richards P G, 1980, Quantitative Seismology: Theory and Methods, San Francisco: W H Freeman and Co.
- Andrews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, In: Das S, Boatwright J, Scholz C H, Earthquake Source Mechanics, 259~267, Washington, D.C.: AGU.
- Archuleta R J, Cranswick E, Mueller C, et al, 1982, Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquake sequence, J Geophys Res, **87**(B6), 4595~4607.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J Geophys Res, **75**(26), 4997~5009.
- Jimenez A, 2005, Simultaneous inversion of source parameters and attenuation factor using genetic algorithms, Bull Seismol Soc Am, **95**(4), 1401~1411.
- McGarr A, 1999, On relating apparent stress to the stress causing earthquake fault slip, J Geophys Res, **104**(B2), 3003~3011.
- Wyss M, 1970, Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches, Geophys J Int, **19**(5), 479~484.
- Wyss M, Brune J N, 1968, Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region, J Geophys Res, **73**(14), 4681~4694.

Temporal and Spatial Characteristics of Apparent Stress before the Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

Huang Hao¹⁾ Fu Hong²⁾

1) Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China

2) Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

Abstract Using waveforms from the China Seismic Array, we calculated the apparent stress of 105 earthquakes with $1.5 \leq M_L \leq 3.3$ within 80km radius of the epicenter about 2 years before the Menyuan $M_s6.4$ earthquake in 2016. The results show that, apparent stress between January 13, 2015 to January 20, 2016 was obviously high than that between March 23, 2014 to January 12, 2015, and apparent stress increased obviously about 1-year before the Menyuan $M_s6.4$ earthquake and decreased significantly, finally increased again about 2 months before the Menyuan $M_s6.4$ earthquake. We used the normalized apparent stress to deduct the effect of magnitude. The comparison of the normalized apparent stress of the two periods show that the stress level of the study area increased about 1-year before the Menyuan $M_s6.4$ earthquake. Spatial distribution of the normalized apparent stress shows that, the Huangcheng-Shuangta fault was a high value anomaly area which appeared 48km away from the epicenter of Menyuan $M_s6.4$ earthquake. The abnormals of apparent stress, Pingan water level and Ledu gas radon show a good corresponding relation with the increase of stress field and was a good seismometry and precursory earthquake case with significant anomaly. The abnormal of apparent stress can judge stress level and define anomaly area. Annual variation of precursory can judge the urgency of time, and therefore using seismometry and precursory anomaly together can make earthquake prediction to a certain extent.

Key words: The Menyuan earthquake; Apparent stress; China Seismic Array