

苏维刚, 王培玲, 冯丽丽, 马震, 赵玉红. 2020. 2016 年门源  $M_s6.4$  地震前兆异常演化特征. 地震学报, 42(1): 24–33. doi: 10.11939/jass.20190108.

Su W G, Wang P L, Feng L L, Ma Z, Zhao Y H. 2020. Evolution characteristics of precursory anomalies before the  $M_s6.4$  Menyuan, Qinghai, earthquake in 2016. *Acta Seismologica Sinica*, 42(1): 24–33. doi: 10.11939/jass.20190108.

## 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震前兆 异常演化特征\*

苏维刚 王培玲 冯丽丽<sup>†</sup> 马震 赵玉红

(中国西宁 810001 青海省地震局)

**摘要** 本文对 2016 年青海门源  $M_s6.4$  地震之前震中周边前兆台站的观测资料进行了回顾性分析, 结果显示有 15 项定点前兆测项震前呈异常, 主要集中在距震中 300 km 的范围内, 其中形变类异常最先出现, 之后以流体类异常为主, 临震阶段以电磁类异常为主. 震前前兆异常的演化在时空上具有阶段性和迁移性, 震前异常出现时间随震中距的变化划分为三个阶段:  $\alpha$  阶段为远源场前兆异常从震中向外围扩散的过程, 异常主要出现在震前 390—630 天;  $\beta$  阶段为前兆异常大范围分布, 主要出现在震前 100—200 天;  $\gamma$  阶段主要为近源场异常向外扩散.

**关键词** 门源  $M_s6.4$  地震 前兆异常 时空演化 三阶段

doi: 10.11939/jass.20190108 中图分类号: P315.72 文献标识码: A

### Evolution characteristics of precursory anomalies before the $M_s6.4$ Menyuan, Qinghai, earthquake in 2016

Su Weigang Wang Peiling Feng Lili<sup>†</sup> Ma Zhen Zhao Yuhong

(Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China)

**Abstract:** By retrospectively analyzing and sorting out the anomalies before the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake, this paper discusses the spatio-temporal evolution characteristics of precursory anomalies before the earthquake. The results show that the anomalies are mainly concentrated in the region within 300 km around the epicenter. Among all kinds of the anomalies, deformation anomalies appeared first, followed by medium- and short-term fluid anomalies, and electromagnetic anomalies in the impending earthquake stage. The evolution of precursory anomalies appears as stage and migration characteristics in space-time. The variation of pre-earthquake anomalies can be divided into  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  three stages. During the  $\alpha$  stage, the precursory anomalies spread from the epicenter to the periphery in the far source field mainly 390–630 days before earthquakes. During the  $\beta$  stage, the precursory anomalies are widely distributed in 100–200 days before earthquakes. During the  $\gamma$  stage, the precursory anomalies of the near-field source spread outwards.

\* 基金项目 青海省地震科技基金(2019B08)和中国地震局地震科技星火计划专项(XH20062)联合资助.

收稿日期 2019-06-19 收到初稿, 2019-08-08 决定采用修改稿.

<sup>†</sup> 通信作者 e-mail: liuwbst@163.com



**Key words:** Menyuan  $M_S6.4$ ; precursory anomalies; spatio-temporal evolution; three stages

## 引言

在印度与欧亚陆-陆汇聚的远程作用下,晚中新世以来青藏高原东北缘迅速抬升.相对于高原内部,东北缘仍处于地表抬升和侧向生长阶段,地形变化、地质构造和地下结构均异常复杂,区内分布的大型深断裂带,多数是重要的大地构造区的边界断裂,同时也是控制现今强震活动的活断层(周民都等, 2000; 袁道阳, 2003; 沈旭章等, 2013).

2016 年 1 月 21 日青海省门源  $M_S6.4$  地震发生于青藏高原东北缘内部的二级块体祁连地块上,微观震中位于(37.7°N, 101.6°E),宏观震中位于门源县泉口镇,震源机制解显示节面 I 走向为 143°、倾角为 35°、滑动角为 91°,节面 II 走向为 335°、倾角为 56°、滑动角为 97°,主压应力轴方位角为 60°、倾角为 0.6°(黄浩等, 2017; 梁姗姗等, 2017).该地震的发震构造为冷龙岭断裂北侧的弧形次生断裂,该次生断裂与冷龙岭断裂一起构成正花状构造,NNW 走向的逆断层在 ENE 向近水平压应力作用下发生错断(胡朝忠等, 2016; 郭鹏等, 2017; 姜文亮等, 2017; 刘云华等, 2019).

门源地震震中虽位于青海省 2016 年度危险区预测范围内,但在震前未作出及时的短临预报,测震学异常主要以中长期异常为主,前兆异常仅在乐都台站提取到一项气氦异常(屠泓为等, 2016; 王培玲等, 2016; 马玉虎等, 2017),震后对门源地震震前的异常特征的分析探讨(李霞等, 2016; 马震, 苏维刚, 2016; 杨晓霞等, 2016; 刘磊等, 2017; 苏维刚等, 2018)多是基于单一学科或多学科异常的简单统计归纳,并未对震前的异常时空演化过程进行综合的分析研究.为此,本文拟通过对门源地震之前震中周边前兆台站的观测资料进行回顾性分析,梳理震前出现的各类异常,总结其变化特征,提取门源地震震前前兆异常的时空演化进程,以期后续的前兆异常综合分析提供思路和参考.

## 1 发震区域构造应力特征

门源地震发震区域所处的祁连山断裂带(图 1)为一条宽约 60 km 的连续变形带,其地壳应变率显著高于周边区域,显示出该断裂带强烈的活动特征.震前的连续 GPS 观测结果显示自 2010 年以来该区域一直处于应变的挤压缩减状态,震中附近区域的 EW 向线应变和面应变率从 2014 年开始出现弱化现象,均表明该区域在震前积累了一定程度的应变能(马海萍等, 2016; 陈为涛等, 2017; 苏小宁, 孟国杰, 2017).

门源  $M_S6.4$  地震震中附近区域的地壳受挤压变形,重力场的异常变化特征亦较为显著.2011 年 5 月—2012 年 5 月青藏高原东北缘测区较大范围内出现了区域性重力异常,至 2014 年 5 月—2015 年 5 月临近发震前局部重力异常变化开始呈“四象限”分布.由于地

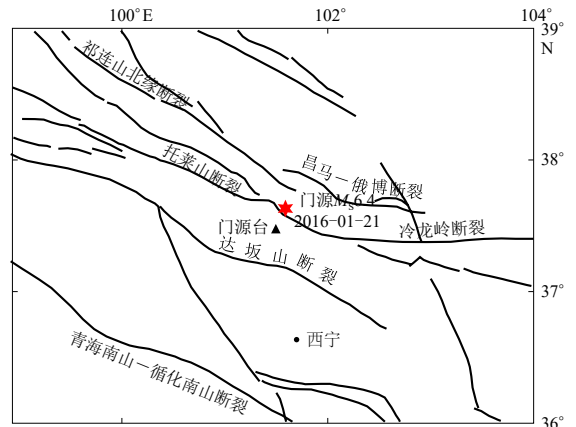


图 1 门源台周边断裂分布

Fig. 1 Fault distribution around Menyuan station

白银台洞体应变 EW 分量 2014 年 9 月开始出现趋势转平异常变化, 打破了 2010—2013 年逐年上升(拉张)的年变形态; 兰州十里店台洞体应变短基线 NS 向自 2014 年 5 月出现趋势性转折上升; 格尔木台钻孔应变 1—3 差应变自 2015 年开始出现年变异常变化, 打破

表 2 门源  $M_{\text{s}}6.4$  地震前兆异常统计

Table 2 Statistics on precursory anomalies of the Menyuan  $M_{\text{s}}6.4$  earthquake

序号	异常项目	台站	异常出现日期 年-月-日	异常结束日期 年-月-日	异常判据	震中距 /km	震例
1	水平摆倾斜	门源	2015-08-18	2015-08-27	转折变化	31	乌兰 $M_{\text{s}}5.1$ , 祁连 $M_{\text{s}}5.2$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
2	垂直摆倾斜	门源	2015-08-18	2015-08-27	转折变化	31	乌兰 $M_{\text{s}}5.1$ , 祁连 $M_{\text{s}}5.2$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
3	静水位	平安	2015-09-01	2016-01-01	年变异常变化	140	门源 $M_{\text{s}}6.4$
4	钻孔倾斜	湟源	2015-11-01	2016-02-01	持续北倾	130	门源 $M_{\text{s}}6.4$
5	气氮	乐都	2015-12-01	2016-03-01	年变异常变化	140	门源 $M_{\text{s}}6.4$
6	钻孔倾斜	寺滩	2016-01-17	2016-01-24	加速北倾	203	门源 $M_{\text{s}}6.4$
7	洞体应变	白银	2015-01-01	2015-10-01	年变异常变化	250	玉树 $M_{\text{s}}7.1$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
8	短基线伸缩 仪NS分量	兰州十 里店	2014-05-01	2016-01-01	趋势转折	258	门源 $M_{\text{s}}6.4$
9	水温	海原	2015-08-01	2015-11-01	转折上升	350	汶川 $M_{\text{s}}8.0$ , 阿拉善 $M_{\text{s}}5.8$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
10	气氮	嘉峪关	2015-09-01	未结束	高值变化	392	玉门 $M_{\text{s}}5.9$ , 民乐 $M_{\text{s}}6.0$ , 海西 $M_{\text{s}}6.3$ , 海西 $M_{\text{s}}6.4$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
11	钻孔应变	格尔木	2015-01-01	2016-02-01	年变异常变化	640	海西 $M_{\text{s}}6.4$ , 玉树 $M_{\text{s}}7.1$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
12	水平摆倾	格尔木	2015-01-01	2016-02-01	趋势性转折	640	海西 $M_{\text{s}}6.3$ , 海西 $M_{\text{s}}6.4$ , 玉树 $M_{\text{s}}7.1$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
13	深井地电	天水	2016-01-05	2016-01-21	加速上升	522	芦山 $M_{\text{s}}7.0$ , 岷漳 $M_{\text{s}}6.6$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$
14	地磁		2015-12-23	2015-12-23	超阈值		岷漳 $M_{\text{s}}6.6$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$ , 阿拉善 $M_{\text{s}}5.0$ , 九寨沟 $M_{\text{s}}7.0$
15	水温	玉树	2015-10-07	2015-11-17	“V”形变化	756	尼泊尔 $M_{\text{s}}8.0$ , 玉树 $M_{\text{s}}7.1$ , 门源 $M_{\text{s}}6.4$ , 杂多 $M_{\text{s}}6.2$

了2011年以来的年变变化；格尔木台水平摆倾斜东西分量自2015年以来出现趋势转折变化，从趋势西倾转为趋势东倾。中长期异常均为形变类，且异常形态均为趋势性转折或年变异常变化。

2.2 中短期异常

海原台干盐池水温在2015年8月开始转折上升，至11月恢复下降趋势，在下降过程中发生门源  $M_{\text{s}}6.4$  地震；门源台两个倾斜分量均于2015年8月18日出现转折变化，8月27日回返；平安台2015年9月23日静水位从原有的下降趋势转变为上升变化，呈年变异常变化；嘉峪关台气氮自2015年9月以来氮值出现高值异常；玉树台水温自2015年10月7日出现下降趋势，10月31日恢复上升，形成“V”形变化；湟源台钻孔倾斜北南分量自2015年11月起加速北倾，门源地震后回返并恢复至水平变化。这样看来，中短期异常主要以流体类为主，且异常形态主要呈趋势上升或“V”形变化，区域地壳受挤压变形，底部热物质上涌至浅层地表，孔隙压增大，水位和水温均表现为上升变化，部分观测井所处的断层灵敏位置，异常呈下降—上升的复杂变化(张永仙, 刘桂萍, 2000; 祝意青等, 2016)。

2.3 短临异常

乐都台气氮在2015年12月出现年变异常变化，大幅度突升；2015年12月23日嘉峪关、格尔木、都兰和贵德等台站的加卸载响应比和日变幅逐日比超阈值；临震前，距震中522 km的天水台深井地电观测EW和NW道日均值于2016年1月5日开始呈加速上升形态，并出现多次起伏；距震中203 km的寺滩台钻孔倾斜NS分量在2016年1月17日出现加速北倾变化。临震异常主要以电磁类为主。

3 定点前兆异常的时空演化特征分析

3.1 前兆异常的时空演化特征

综合门源地震前提取的 15 项前兆异常，从震前异常的时间演化来看：该地震震前 2 年白银洞体应变和兰州十里店台短基线伸缩仪分别出现年变异常变化和趋势性转折异常；震前 1 年格尔木台钻孔应变差应变和水平摆倾斜 EW 分量分别出现年变异常变化和趋势性转折异常；震前 5—3 个月门源台倾斜等形变类短期异常和乐都台气氦等流体类短期异常集中出现；震前 23—15 天和震前 4 天分别出现天水台深井地电阻率等电磁类异常和寺滩台钻孔倾斜等形变类异常。这些异常的出现时间如图 3 所示，可见随时间推移长—中—短—临异常依次出现。

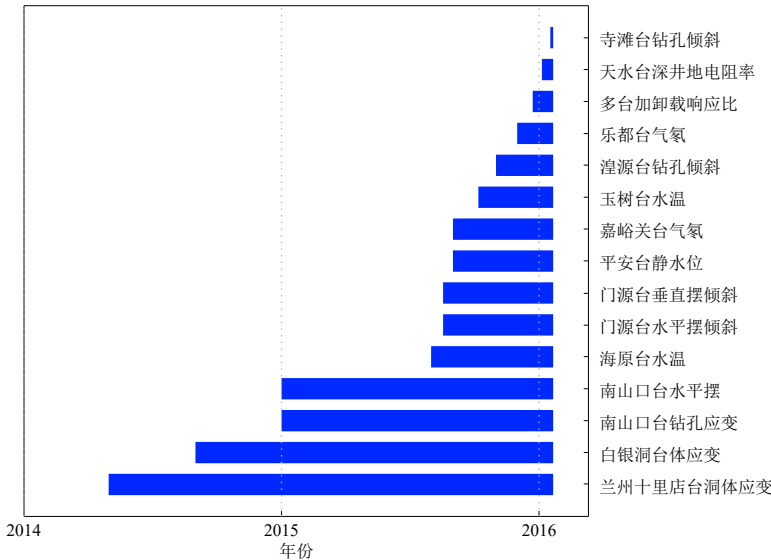


图 3 门源地震前前兆异常时间进程

Fig. 3 The time process of precursory anomalies before the Menyuan earthquake

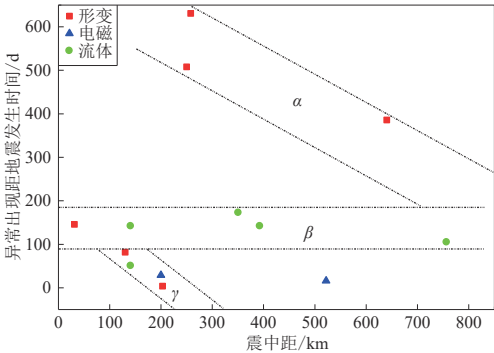


图 4 门源地震前异常时间随震中距的阶段变化

Fig. 4 Stage variation of anomaly time with epicentral distance before the Menyuan earthquake

在考虑震前异常时间演化进程的基础上，通过研究异常的空间分布特征可知：首先在距震中 250—650 km 的范围出现年变异常变化和趋势转折异常等中长期异常；之后随时间推移中短期异常出现，大部分异常主要集中在距震中 150—50 km 的范围内，少量异常如玉树水温异常出现在距震中 756 km 处；发震前临震异常出现在距震中 200—500 km 的区域内。

冯德益基于诸多震例资料的分析研究，明确地提出了地震前兆过程的 3 个发展阶段，即  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  阶段 (Feng, 1983)。本文将

门源地震前的前兆异常出现时间与震中距关系绘制成图, 如图 4 所示, 可见异常开始时间随震中距的阶段变化同样可以划分为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  等三个阶段:  $\alpha$  阶段为远源场前兆异常从震中向外围扩散的过程, 异常主要出现在震前 390—630 天内, 震中距主要介于 260—640 km 之间;  $\beta$  阶段为前兆异常大范围分布, 主要出现在震前 100—200 天, 且在震中距 30—760 km 内均有分布;  $\gamma$  阶段为前兆异常从震中向外围扩散的过程, 且为近源场异常向外扩散。

考虑到不同震级和不同区域的地震活动前兆异常演化的差异性, 据《中国震例》选取西北地区前兆异常相对丰富的 2014 年 4 月 14 日玉树  $M_S7.1$  地震和 2013 年 7 月 22 日岷漳  $M_S6.6$  地震进行对比分析. 玉树  $M_S7.1$  地震震中 500 km 范围内共有 7 个前兆观测台站, 震前出现 8 条异常, 属 5 个异常项目; 岷漳  $M_S6.6$  地震震中 300 km 范围内共有 17 个前兆观测台站, 震前出现 12 条异常, 属 5 个异常项目. 将两次地震前的异常出现时间与震中距关系绘制成图, 如图 5 所示, 可见异常开始时间随震中距的阶段变化基本符合  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三阶段的发展. 玉树地震前(图 5a),  $\alpha$  阶段远源场前兆异常从震中向外围扩散;  $\beta$  阶段前兆异常大范围分布, 异常较为分散;  $\gamma$  阶段前兆异常为远源场异常, 向震中逼近. 岷漳地震前(图 5b),  $\alpha$  阶段前兆异常从震中向外围扩散, 且为近源场异常;  $\beta$  阶段前兆异常较为分散且异常数量较少;  $\gamma$  阶段前兆异常为近源场异常, 向外扩散。

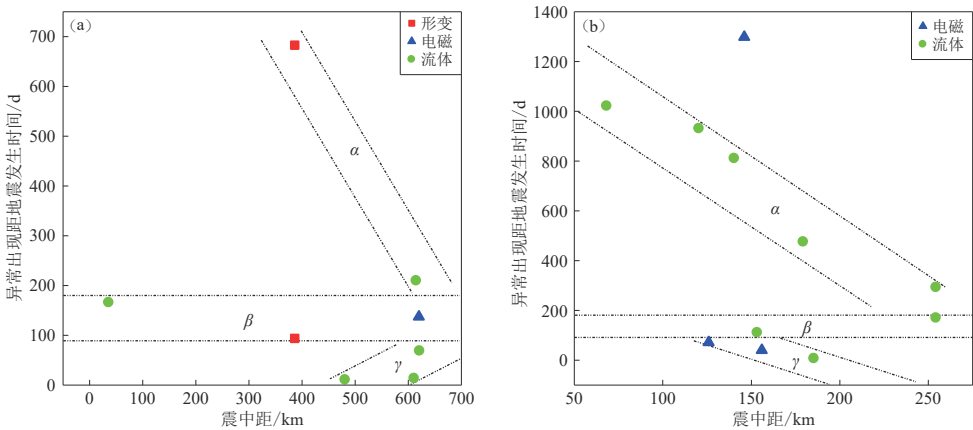


图 5 玉树(a)和岷漳(b)地震前异常出现时间随震中距的阶段变化

Fig. 5 Stage-variation of anomaly time with epicentral distance before Yushu (a) and Minzhang (b) earthquakes

综合三次震例可以看出, 前兆异常在时空演化上具有阶段性和迁移性, 均具有  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三阶段的变化, 不同之处表现在: 玉树  $M_S7.1$  地震在  $\gamma$  阶段为远源场异常向震中逼近, 门源  $M_S6.4$  和岷漳  $M_S6.6$  地震在  $\gamma$  阶段为近源场异常向外扩散. 前人针对唐山  $M_S7.8$ 、汶川  $M_S8.0$ 、九寨沟  $M_S7.0$  等一系列显著地震的研究表明前兆异常均具有明显的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三阶段特征(梅世蓉等, 1993; 宋治平, 薛艳, 2009; 张小涛等, 2018a, b), 且  $\gamma$  阶段表现为近源区向外扩散的过程. 由此说明, 在地震孕育过程中前兆异常演化的阶段性具有普遍性, 但因孕震区的构造活动过程有所不同, 不同震例前兆异常的阶段性演化略有不同。

### 3.2 前兆异常的机理探讨

前兆场异常随时间和空间的不断演化受孕震体的物理化学性质和地壳应力状态的变化



所控制(李丽, 张国民, 1999). 在强震孕育过程中, 断层活动分布范围广, 随着构造应力的增加和传递, 外围断层大范围的活动不断向未来震中区转移; 至孕震晚期, 断层活动分布范围缩小, 仅限于震源区附近及发震断层带上(何世海, 1995; 陆明勇等, 2003).

冯德益的三阶段演化理论(Feng, 1983)可以与地震孕育的三个阶段相联系:  $\alpha$  阶段微破裂发生、发展, 当微破裂串通到足够程度后产生非震滑动或蠕动;  $\beta$  阶段除断层预滑外可能还存在气压、温度等大范围的变化.

门源地震前兆异常的演化阶段与冯德益的三阶段演化(Feng, 1983)略有不同, 门源地震前异常演化的  $\gamma$  阶段为近源场异常向外扩散, 而冯德益研究提出地震前兆异常的  $\gamma$  阶段为从外围向震源区收缩, 宋治平等(2000)基于包体流变模型计算的结果显示球形硬包体的地面体应变随时间的变化表现出  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  等三个阶段, 其中:  $\alpha$  阶段前兆在近源区和远源区均向外扩展;  $\beta$  阶段前兆在近源区和远源区均处于极值状态;  $\gamma$  阶段前兆在远源区向近源区收缩, 而在近源区向外扩展. 基于孕震模型计算的体应变三阶段特征与地震前兆异常演化阶段具有较好的一致性, 说明在地震孕育过程中区域应变场存在三阶段的演化过程.

## 4 讨论与结论

通过对门源地震前异常的梳理和分析, 进而探讨其前兆异常的演化特征, 得到以下结果:

- 1) 前兆异常主要集中在距震中 300 km 的范围内, 且以中短期异常为主;
- 2) 前兆异常的演化呈“长—中—短—临”时间进程特征, 且中长期异常主要以形变类为主, 中短期异常主要以流体类为主, 短临异常主要以电磁类为主;
- 3) 震前异常演化在空间上具有阶段性和迁移性, 分  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  阶段.  $\alpha$  阶段前兆异常从震中向外围扩散;  $\beta$  阶段异常从震中到外围大范围分布;  $\gamma$  阶段主要以近源场异常向外扩散为主.

门源  $M_{\text{s}}6.4$  地震未作出及时的短临预报, 但通过异常梳理可知, 短临异常有 4 项, 中短期异常数量更多, 如何通过足够多的中短期异常把握异常的时空演化进程呢? 对门源  $M_{\text{s}}6.4$ 、岷漳  $M_{\text{s}}6.6$  和玉树  $M_{\text{s}}7.1$  的震例研究结果显示: 震前异常演化在时空上均具有  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  三阶段演化特征, 且  $M7$  地震在  $\gamma$  阶段表现为远源场异常向震中逼近,  $M6$  地震在  $\gamma$  阶段表现为近源场异常向外扩散, 在未来震情跟踪过程中, 应把握这种异常迁移规律, 及时捕捉地震信号, 作出有减灾实效的短临地震预报.

青海省地震局预报中心各位同事为本文提供了前兆异常分析资料, 在此向他们表示衷心感谢.

## 参 考 文 献

- 陈为涛, 甘卫军, 肖根如, 王阅兵, 连尉平, 梁诗明, 张克亮. 2017. 2016 年青海门源  $M_{\text{s}}6.4$  地震前的区域地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, 37(8): 777–781.
- Chen W T, Gan W J, Xiao G R, Wang Y B, Lian W P, Liang S M, Zhang K L. 2017. The regional crustal deformation before the 2016 Menyuan  $M_{\text{s}}6.4$  earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 37(8): 777–781 (in Chinese).
- 郭鹏, 韩竹军, 安艳芬, 姜文亮, 毛泽斌, 冯蔚. 2017. 冷龙岭断裂系活动性与 2016 年门源 6.4 级地震构造研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(5): 617–630.
- Guo P, Han Z J, An Y F, Jiang W L, Mao Z B, Feng W. 2017. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of

- the 2016  $M_s6.4$  Menyuan earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, **60**(5): 929–942.
- 何世海. 1995. 华北地震场和源地壳形变前兆研究[J]. *地震*, **1**(3): 199–207.
- He S H. 1995. Study on the earthquake source and field precursors of crustal deformation in North China[J]. *Earthquake*, **1**(3): 199–207 (in Chinese).
- 胡朝忠, 杨攀新, 李智敏, 黄帅堂, 赵妍, 陈丹, 熊仁伟, 陈庆宇. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨[J]. *地球物理学报*, **59**(5): 1637–1646.
- Hu C Z, Yang P X, Li Z M, Huang S T, Zhao Y, Chen D, Xiong R W, Chen Q Y. 2016. Seismogenic mechanism of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai  $M_s6.4$  earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(5): 1637–1646 (in Chinese).
- 黄浩, 付虹, 沙成宁, 王培玲. 2017. 2016 年青海门源  $M_s6.4$  地震重定位[J]. *地震学报*, **39**(2): 176–187.
- Huang H, Fu H, Sha C N, Wang P L. 2017. Relocation of the 2016  $M_s6.4$  Menyuan, Qinghai earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(2): 176–187 (in Chinese).
- 姜文亮, 李永生, 田云锋, 韩竹军, 张景发. 2017. 冷龙岭地区 2016 年青海门源 6.4 级地震发震构造特征[J]. *地震地质*, **39**(3): 536–549.
- Jiang W L, Li Y S, Tian Y F, Han Z J, Zhang J F. 2017. Research of seismogenic structure of the Menyuan  $M_s6.4$  earthquake on January 21, 2016 in Lenglongling area of NE Tibetan Plateau[J]. *Seismology and Geology*, **39**(3): 536–549 (in Chinese).
- 李丽, 张国民. 1999. 前兆场动态演化与强震成组活动[J]. *中国地震*, **15**(4): 18–31.
- Li L, Zhang G M. 1999. Evolution of precursory field and its relation with the group of strong earthquakes[J]. *Earthquake Research in China*, **15**(4): 18–31 (in Chinese).
- 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[J]. *地震研究*, **39**(增刊 1): 122–127.
- Li X, Liu L, Feng L L. 2016. Analysis on geomagnetic precursory characteristics before Qinghai Menyuan  $M_s6.4$  earthquake in 2016[J]. *Journal of Seismological Research*, **39**(S1): 122–127 (in Chinese).
- 梁姗姗, 雷建设, 徐志国, 邹立晔, 刘敬光. 2017. 2016 年 1 月 21 日青海门源  $M_s6.4$  余震序列重定位和主震震源机制解[J]. *地球物理学报*, **60**(6): 2091–2103.
- Liang S S, Lei J S, Xu Z G, Zou L H, Liu J G. 2017. Relocation of the aftershock sequence and focal mechanism solutions of the 21 January 2016 Menyuan, Qinghai,  $M_s6.4$  earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(6): 2091–2103 (in Chinese).
- 刘磊, 李霞, 冯丽丽, 祁昌炜, 王佳音. 2017. 2016 年门源  $M_s6.4$  地震前乐都气氡异常特征[J]. *地震学报*, **39**(2): 296–299.
- Liu L, Li X, Feng L L, Qi C W, Wang J Y. 2017. Characteristics of gas radon concentration anomaly at Ledu before the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(2): 296–299 (in Chinese).
- 刘云华, 张迎峰, 张国宏, 郑博文, 靳新建. 2019. 2016 年 1 月 21 日门源  $M_s6.4$  级地震 InSAR 同震形变及发震构造研究[J]. *地球物理学进展*, **34**(3): 896–907.
- Liu Y H, Zhang Y F, Zhang G H, Zheng B W, Shan X J. 2019. Study of the D-InSAR deformation field and seismotectonics of the Menyuan  $M_s6.4$  earthquake on January 21, 2016[J]. *Progress in Geophysics*, **34**(3): 896–907 (in Chinese).
- 陆明勇, 牛安福, 周峥嵘. 2003. 强震中短期阶段断层活动时空演化特征的讨论[J]. *地震*, **23**(4): 1–9.
- Lu M Y, Niu A F, Zhou Z R. 2003. Discussion on spatio-temporal evolutionary characteristics of faulting activity in the middle-short period of strong earthquake[J]. *Earthquake*, **23**(4): 1–9 (in Chinese).
- 马海萍, 冯建刚, 窦喜英, 李晓峰, 张辉. 2016. 2016 年门源  $M6.4$  地震前区域地壳形变特征[J]. *遥感技术与应用*, **31**(6): 1167–1173.
- Ma H P, Feng J G, Dou X Y, Li X F, Zhang H. 2016. The crustal deformation characteristics before the Jan. 21, 2016  $M_s6.4$  Menyuan earthquake in Qinghai Province[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, **31**(6): 1167–1173 (in Chinese).
- 马玉虎, 马震, 杨晓霞, 王培玲, 余娜, 李霞, 刘文邦. 2017. 2016 年门源 6.4 级地震异常分析[J]. *高原地震*, **29**(4): 1–11.
- Ma Y H, Ma Z, Yang X X, Wang P L, Yu N, Li X, Liu W B. 2016. Analysis on the precursory anomalies of Menyuan  $M_s6.4$



- earthquake in 2016[J]. *Plateau Earthquake Research*, **29**(4): 1–11 (in Chinese).
- 马震, 苏维刚. 2016. 2016年青海门源6.4级地震前青海定点形变异常[J]. 地震研究, **39**(增刊1): 112–116.
- Ma Z, Su W G. 2016. Precursory anomalies of fixed point deformation before Qinghai Menyuan  $M_s6.4$  earthquake in 2016[J]. *Journal of Seismological Research*, **39**(S1): 112–116 (in Chinese).
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 朱岳清, 高旭, 张肇诚. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社: 241–263.
- Mei S Y, Feng D Y, Zhang G M, Zhu Y Q, Gao X, Zhang Z C. 1993. *Introduction to Earthquake Prediction in China*[M]. Beijing: Seismological Press: 241–263 (in Chinese).
- 沈旭章, 周元泽, 张元生, 刘旭宙, 秦满忠, 李翠芹. 2013. 青藏高原东北缘地壳结构变化的地球动力学意义[J]. 地球物理学进展, **28**(5): 2273–2282.
- Shen X Z, Zhou Y Z, Zhang Y S, Liu X Z, Qin M Z, Li C Q. 2013. Geodynamic significance of the crust structure beneath the northeastern margin of Tibet[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(5): 2273–2282 (in Chinese).
- 宋治平, 尹祥础, 梅世蓉. 2000. 包体流变模型体应变场时空演变的理论分析[J]. 地震学报, **22**(5): 491–500.
- Song Z P, Yin X C, Mei S R. 2000. Theoretical analysis of the spatio-temporal evolution of the bulk-strain field based on a rheologic inclusion model[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **22**(5): 491–500 (in Chinese).
- 宋治平, 薛艳. 2009. 华北中强地震前兆特征研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社: 100–149.
- Song Z P, Xue Y. 2009. *Study on Precursor Characteristics of Medium-Strong Earthquakes in North China*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press: 100–149 (in Chinese).
- 苏维刚, 马震, 孙玺浩. 2018. 门源6.4级地震前后倾斜异常的识别与分析[J]. 高原地震, **30**(3): 1–6.
- Su W G, Ma Z, Sun X H. 2018. The identification and mechanism analysis of Menyuan tilt anomaly characteristics[J]. *Plateau Earthquake Research*, **30**(3): 1–6 (in Chinese).
- 苏小宁, 孟国杰. 2017. 2016年青海门源 $M_s6.4$ 地震震前应变积累及同震变形特征[J]. 地震, **37**(4): 1–9.
- Su X N, Meng G J. 2017. Pre-seismic strain accumulation and co-seismic deformation from the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake[J]. *Earthquake*, **37**(4): 1–9 (in Chinese).
- 屠泓为, 王培玲, 张晓清, 马震, 黄浩. 2016. 2016年青海门源6.4级地震震情跟踪概述及震后总结[J]. 地震研究, **39**(增刊1): 9–13.
- Tu H W, Wang P L, Zhang X Q, Ma Z, Huang H. 2016. Overview of tracking of Qinghai Menyuan  $M_s6.4$  earthquake in 2016 and its post earthquake precursor anomaly summary[J]. *Journal of Seismological Research*, **39**(S1): 9–13 (in Chinese).
- 王培玲, 苏维刚, 孙丽. 2016. 2016年青海门源6.4级地震前震学异常回顾与思考[J]. 地震研究, **39**(增刊1): 14–19.
- Wang P L, Su W G, Sun L. 2016. Review and thinking of seismometry anomalies before Qinghai Menyuan  $M_s6.4$  earthquake in 2016[J]. *Journal of Seismological Research*, **39**(S1): 14–19 (in Chinese).
- 王同庆, 陈石, 梁伟锋, 刘金钊. 2018. 2016年门源 $M_s6.4$ 地震前的区域重力场变化与定量参数分析[J]. 地震地质, **40**(2): 349–360.
- Wang T Q, Chen S, Liang W F, Liu J Z. 2018. Variations of the gravity field and quantitative parameter analysis before the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **40**(2): 349–360 (in Chinese).
- 杨晓霞, 王小玲, 李玉丽, 孙春玲, 孙丽. 2016. 2016年青海门源 $M_s6.4$ 地震前地下流体异常特征分析[J]. 地震研究, **39**(增刊1): 89–94.
- Yang X X, Wang X L, Li Y L, Sun C L, Sun L. 2016. Analysis on anomaly characteristics of underground fluid before Qinghai Menyuan  $M_s6.4$  earthquake in 2016[J]. *Journal of Seismological Research*, **39**(S1): 89–94 (in Chinese).
- 袁道阳. 2003. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 19–21.
- Yuan D Y. 2003. *Tectonic Deformation Features and Space-Time Evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau Since the Late Cenozoic Time*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 19–21 (in Chinese).
- 张小涛, 刘杰, 宋治平, 薛艳, 张永仙, 晏锐, 苑争一. 2018a. 汶川 $M_s8.0$ 地震的前兆异常时空演化过程及其力学分析[J]. 地震, **38**(2): 72–83.
- Zhang X T, Liu J, Song Z P, Xue Y, Zhang Y X, Yan R, Yuan Z Y. 2018a. Temporal and spatial evolution of precursory anomalies of the 2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake and mechanical analysis[J]. *Earthquake*, **38**(2): 72–83 (in Chinese).
- 张小涛, 宋治平, 李纲. 2018b. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震的前兆异常时空演化特征及其分析[J]. 中国地震, **34**(4): 772–780.

- Zhang X T, Song Z P, Li G. 2018b. Temporal and spatial evolution of precursory anomalies of the Jiuzhaigou  $M_s7.0$  earthquake and its analysis[J]. *Earthquake Research in China*, **34**(4): 772–780 (in Chinese).
- 张永仙, 刘桂萍. 2000. 张北 6.2 级地震近震区前兆异常特征及时空演化研究[J]. *地震*, **20**(1): 53–58.
- Zhang Y X, Liu G P. 2000. Study on characteristics of anomalies near by epicenter of Zhangbei  $M_s6.2$  earthquake and their spatial and temporal evolution[J]. *Earthquake*, **20**(1): 53–58 (in Chinese).
- 周民都, 吕太乙, 张元生, 阮爱国. 2000. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究[J]. *地震学报*, **22**(6): 645–653.
- Zhou M D, Lü T Y, Zhang Y Y, Ruan A G. 2000. The geological structure background and the crustal structure in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **22**(6): 645–653 (in Chinese).
- 祝意青, 李铁明, 郝明, 梁伟锋, 赵云峰, 徐云马, 郝庆花. 2016. 2016 年青海门源  $M_s6.4$  地震前重力变化[J]. *地球物理学报*, **59**(10): 3744–3752.
- Zhu Y Q, Li T M, Hao M, Liang W F, Zhao Y F, Xu Y M, Hao Q H. 2016. Gravity changes before the Menyuan, Qinghai  $M_s6.4$  earthquake of 2016[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(10): 3744–3752 (in Chinese).
- Feng D Y. 1983. Three-stage development process of earthquake precursors: Observations and theory[J]. *Journal of Seismological Research*, **6**(2): 211–226.
- Liu J Z, Wang T Q, Chen Z H, Zhang P, Zhu C D, Zhang S X. 2018. Analyzing gravity anomaly variations before the 2016  $M_s6.4$  earthquake in Menyuan, Qinghai with an interpolation/cutting potential field separation technique[J]. *Appl Geophys*, **15**(1): 137–146.