

2016 年青海门源 6.4 级地震前的地震拟合 优度异常研究*

李 滔¹, 钟卫星^{2*}

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001, 2. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 运用 G-R 公式的原理, 对 2016 年门源 6.4 级地震震中及周边区域进行地震拟合优度的时间和空间扫描计算。时间扫描结果显示, 地震前 27 个月, 震中及周边的地震拟合优度值发生大幅度下降并低值持续, 震前 2 个月内再次发生明显下降直至发震。空间扫描结果显示, 地震前震中及周边的地震拟合优度等值线分布明显变化, 相邻 2 个低值区扩张并合并, 震中区域乃至整个研究区域的拟合优度值明显下降。因此, 在门源 6.4 级地震前, 由于孕震过程引起应力积累导致震中区域大小震比例失调, 使得震中周边区域的地震拟合优度值出现明显的低值过程。

关键词: G-R 公式; 地震拟合优度; 门源地震; 时空扫描

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)增刊 1-0028-07

0 引言

G-R 公式, 即 $\log N = a - bM$, 是古登堡和里希特在研究全球地震活动性时, 对各地区 6 级以上地震进行统计得到的经验公式。 N 为地震频度, M 为震级。 b 值即为拟合直线的斜率, 直接反映了大、小地震之间的比例关系。地震拟合优度就是 $\log N$ 和 M 之间的线性拟合相关系数 (马建新, 李滔, 2010)。

李志雄等 (1996) 对我国东部地区 (108°E 以东) 部分 $M_s \geq 5.0$ 中强地震前一定时空尺度内中小地震频次与震级线性拟合优度 (线性相关系数 r) 进行研究, 发现其线性拟合优度在地震前出现不同程度的异常现象。其变化特点是: 在中强地震发生前期, 震源区及其附近中小地震的发生在能级上分配均匀, 线性拟合优度接近 1; 随着中强地震的临近, 该区中小地震在能级上的分配存在着较显著的不均匀现象, 表现为线性拟合优度明显下降。这种拟合优度的异常变化具有中期异常性质, 有可能为中强地震的中期判定提供依据。段玉石等 (2010) 在对华北地区部分中强以上地震进行研究后发现, 部分中强以上地震震前一定

时期, 地震活动不同程度地存在着震级和频度偏离 G-R 现象, 震级越大, 震前偏离 G-R 关系越明显, 这种偏离与地震发生所处地块无关联。郭德科等 (2003) 对华北地区 18 次中强地震前地震拟合优度 r 值与地震活动的关系进行了分析和研究, 总结出了中强地震前地震拟合优度 r 值的异常特征。桂荣和黄瑜 (2006) 分析研究了 1978 ~ 2005 年 28 个 $M_s \geq 5.5$ 地震线性拟合优度 r 值在地震前异常变化过程及变化特征。马建新等 (2014) 对中国大陆 31 次中强以上地震进行了地震拟合优度计算, 分析发现 77% 的地震震前震中周边一定区域内地震拟合优度出现明显下降异常, 若同震或震后 1 ~ 2 月内再次出现明显下降, 数年内周边 500 km 内往往再次有中强地震发生。

在以上专家研究的基础上, 李滔等 (2008, 2009)、杜娟和马建新 (2012)、马建新等 (2014) 先后对青海省 1990 年共和 7.0 级、2008 年大柴旦 6.6 级和 2010 年玉树 7.1 级地震前后震中周边区域的地震拟合优度进行过计算分析, 认为在这几次地震前一段时间内, 震中周边一定区域内均出现了地震拟合优度明显下降的情况, 地震拟合优度可以作为该区域中强地震的预报指标之一。

本文选取 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震震

* 收稿日期: 2016-08-23.

♣ 通讯作者: 钟卫星 (1973 ~), 工程师. 主要从事台站地震监测和数据分析工作. E-mail: Zhongldz@163.com.

中及其周边区域作为研究区域, 计算区域内的地震拟合优度, 从时间和空间的角度对异常的演化特征进行分析。

1 地震拟合优度的计算公式

以 $G-R$ 关系式 $\log N = a - bM$ 为基础, 运用数理统计的方法, 对地震数据进行最小二乘法计算。

对于一对数据序列 $\{x_i\}$ 、 $\{y_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 若变量 x 、 y 之间服从 $y = a + bx$ 统计关系, 则由最小二乘法便可确定式中常数 a 、 b 及表征 x 、 y 两个变量按 $y = a + bx$ 关系式拟合优度好坏的相关系数 r 。具体表达式如下:

$$\frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \quad (1)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (2)$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}}. \quad (3)$$

其中, r 为反映 y 与 x 之间相关程度的相关系数, 亦为文中所谓的线性拟合优度。式中

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}, \quad (4)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n}, \quad (5)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (6)$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (7)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (8)$$

2 资料和计算参数的选取

笔者将 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震震中 (37.68°N , 101.62°E) 及周边区域作为主要研究区域。选取 1983 年 1 月 ~ 2016 年 4 月的地震

目录进行计算, 所用地震目录由青海省地震局分析预报中心提供, 震级为 M_L 震级。图 1 中标注的地震来自中国地震台网中心共享目录, 震级为 M_s 震级。

由于余震和震群活动会掩盖地震作为独立事件的活动特征, 因此计算前, 首先对地震目录进行余震的删除。采用陆远忠等 (2002) 编制的 MAPSIS 软件, 用主震震级法进行了余震删除。

3 拟合优度时空特征分析

3.1 时间变化特征

时间扫描采用的参数选取为: 震级下限为 2.5、震级分档为 0.5、时间步长为 1 个月、时间窗长为 12 个月, 空间区域为震中周边 $3^\circ \times 3^\circ$ 区域。

从图 1 中可以看出, 1983 年以来, 地震拟合优度曲线发生了多次突降并有低值持续的过程。将初始值 ≥ 0.85 的下降作为一次下降的起始点, 初始值 < 0.85 的下降则作为前次下降的低值持续过程, 前次明显下降后未回升或略有回升之后又持续下降的, 不论再次下降的初始值是否高于 0.85, 均作为前次下降过程的延续, 且低值持续时间超过半年作为标准进行统计, 该曲线共有过 7 次比较明显的下降—低值持续过程。每次下降过程详细参数见表 1。

为了研究地震拟合优度的变化与周边发生的中强地震的对应关系, 本文选取门源 6.4 级地震震中周边 600 km 以内的 $M_s \geq 6.0$ 地震进行分析。

从图 1 中可以看出, 该时段内周边 500 km 范围共发生 $M_s \geq 6.0$ 地震 11 次。大部分地震均发生在曲线首次突降之后的低值持续期间, 从突降到发震的时间间隔在 14 ~ 29 个月之间。

7 次低值过程中, 只有 2012 年 6 月 ~ 2013 年 3 月的低值过程中无 $M_s \geq 6.0$ 地震发生, 但其回升后 3 个月内发生了 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震。此次低值过程可能与该地震有关, 其持续时间较短且在回升后才发震, 可能与震中距 (420 km) 较远有关。

2009 年 8 月 31 日大柴旦 6.1 级地震是在数据回升并转平 9 个月后发震的。该地震是 2009 年大柴旦 6.6 级地震的余震, 且震中距达 497 km, 主震的震中距则超过 500 km, 因此在门源震中附近没有出现明显的拟合优度异常反应。

2013 年 10 月，拟合优度曲线从 9 月的 0.891 突降至 0.758，之后低值持续到 2014 年 6 月，7 月起小幅度回升并转平，到 2015 年 11 月，曲线再次发生明显下降，12 月加速下降，2016 年 1 月 21 日发生门源 6.4 级地震。发震当月拟合优度曲线下降

至最低值 0.593，次月起回升。到 2016 年 4 月，曲线已经部分回升，但仍处于低值持续过程中。此次地震前的震前异常持续时间长达 27 个月，不论是单次突降的幅度还是累计下降的幅度，都是几次突降中较大的。

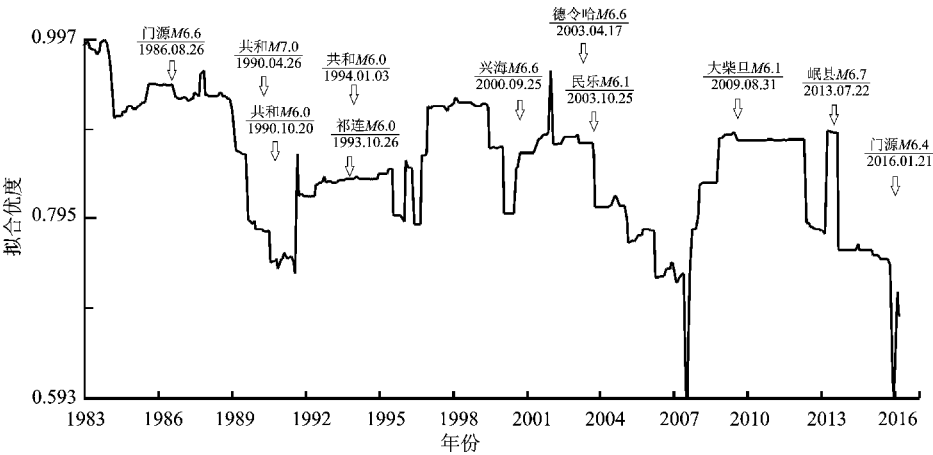


图 1 2016 年门源 6.4 级地震震中周边区域地震拟合优度曲线

Fig. 1 The goodness of fit curve in the surrounding area of epicenter of Menyuan M_s 6.4 earthquake in 2016

表 1 门源 6.4 级地震周边地震拟合优度异常与中强地震对应关系统计表

Tab. 1 Statistic of the corresponding relationship between goodness of fit anomaly and the medium – strong earthquakes in the surrounding area of the epicenter of Menyuan M_s 6.2 earthquake

序号		日期/年－月	降幅	$M_s \geq 6.0$ 地震			时差/月	
				发震日期/年－月－日	震级	震中位置		
1	开始	1984－03	0.058	1986－08－26	6.6	门源	29	
	结束	1987－09						
2	开始	1989－02	0.184	1990－04－26	7.0	共和	14	
	结束	1991－08		1990－10－20	6.1	天祝、景泰间	20	
3	开始	1991－09	0.048	1993－10－26	6.0	祁连	24	
	结束	1996－09		1994－01－03	6.0	共和	27	
4	开始	1999－07	0.080	2000－09－12	6.6	兴海	14	
	结束	2000－12						
5	开始	2002－02	0.367	2003－04－17	6.6	德令哈	14	
	结束	2008－10		2003－10－25	6.1	民乐、山丹间	20	
				(2009－08－31)	(6.1)	(大柴旦)	(78)	
6	开始	2012－06	0.106	(2013－07－22)	(6.7)	(岷县)	(13)	
	结束	2013－03						
7	开始	2013－10	0.298	2016－01－21	6.4	门源	27	
	结束	至今						

说明：加（）为低值过程结束后发生的地震。

3.2 空间变化特征

空间扫描的参数选取为：震级下限为 3.0、震级分档为 0.5、空间步长为 1°、空间窗长为 3°。为

了保证足够的地震数量，每次扫描的时间长度为 1 年，即 2015 年 12 月的计算结果采用的是 2015 年 1 ~ 12 月的地震目录进行计算，其他计算结果的时

间以此类推, 扫描结果见图 2。从图中可以看出, 2013 年 9 月, 震源区附近虽然不是最高值区, 但接近 0.8, 处于较高水平。10 月起低值区扩张, 震源区附近的拟合优度值明显下降。至 2014 年 3 月, 低值区分化为 2 个, 震源区处于 2 个低值区之间, 这一格局一直持续至 2015 年 10 月。11 月, 拟合优度值低值区略有扩张, 震中附近的拟合优度值

也小幅度下降。由于变化幅度小, 从色块图上看不出明显的变化。12 月, 震源附近的拟合优度值继续下降, 2 个低值区合并。2016 年 1 月 21 日发生了门源 6.4 级地震。受地震影响, 2016 年 1 月震中及周边区域的地震拟合优度低值区继续扩张, 周边区域内拟合优度值均出现明显下降, 2 月则明显回升。

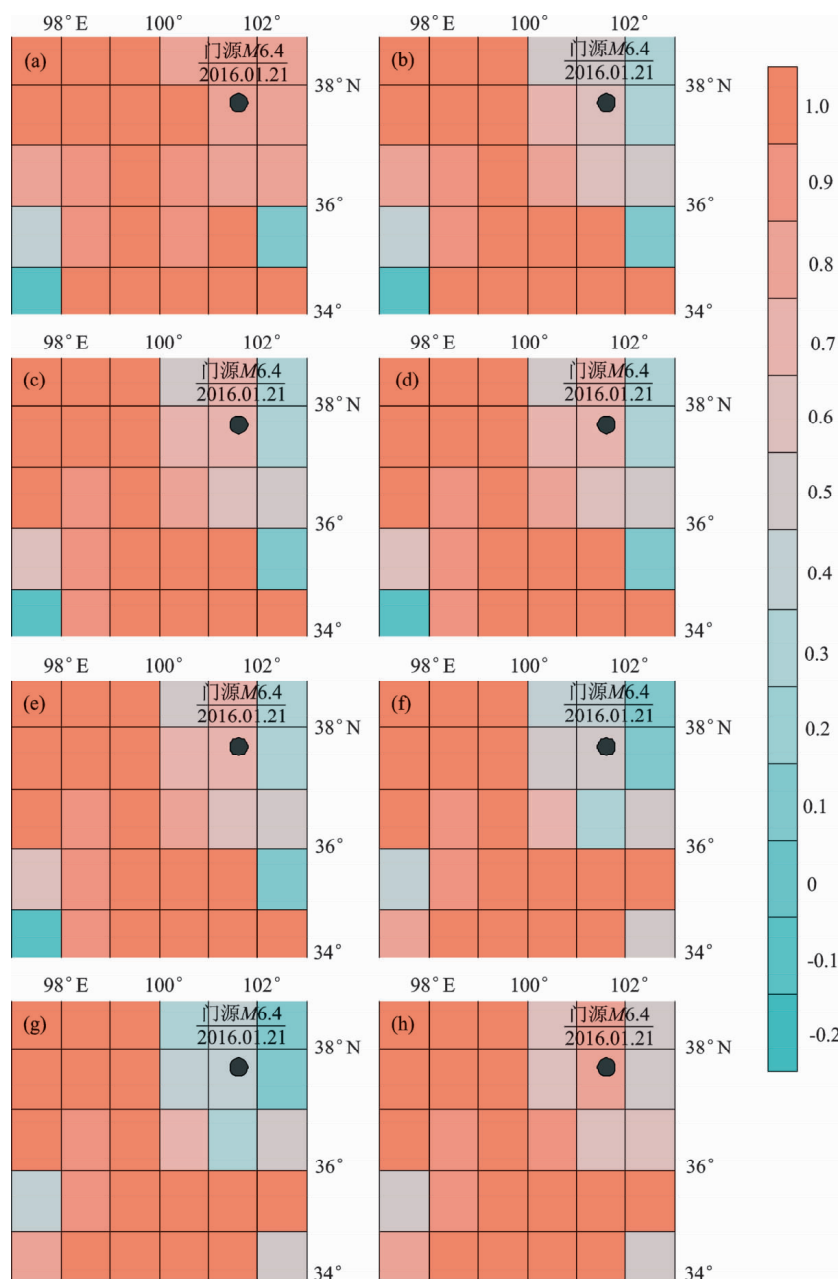


图 2 2016 年门源 6.4 级地震及周边区域地震拟合优度空间分布演化图

(a) 2013-09; (b) 2013-10; (c) 2014-03; (d) 2015-10; (e) 2015-11;
(f) 2015-12; (g) 2016-01; (h) 2016-02

Fig. 2 The evolution map about the spatial distribution of the goodness of fit of earthquakes in the surrounding area of the epicenter of Menyuan $M_s 6.4$ earthquake in 2016

对 1986 年以来青海省的几次 $M_s \geq 6.0$ 地震研究发现,在震前一段时间内,震中附近区域大都出现了低值区的扩张—收缩的过程。图 3 为 2000 年 9 月 12 日兴海 6.6 级地震震前一段时间的地震拟合优度空间分布的演化图象。从图中可以看出,震前 19 个月,即 1999 年 2 月,震源区附近的地震

拟合优度出现大面积低值区,持续到 10 月低值区收缩,12 月低值区再次小幅度扩张,到 2000 年 8 月低值区再度收缩,震源附近的地震拟合优度值升高到高值,直至发震当月,震后次月,震源区及周边的地震拟合优度值整体略有下降,如图 3 所示。

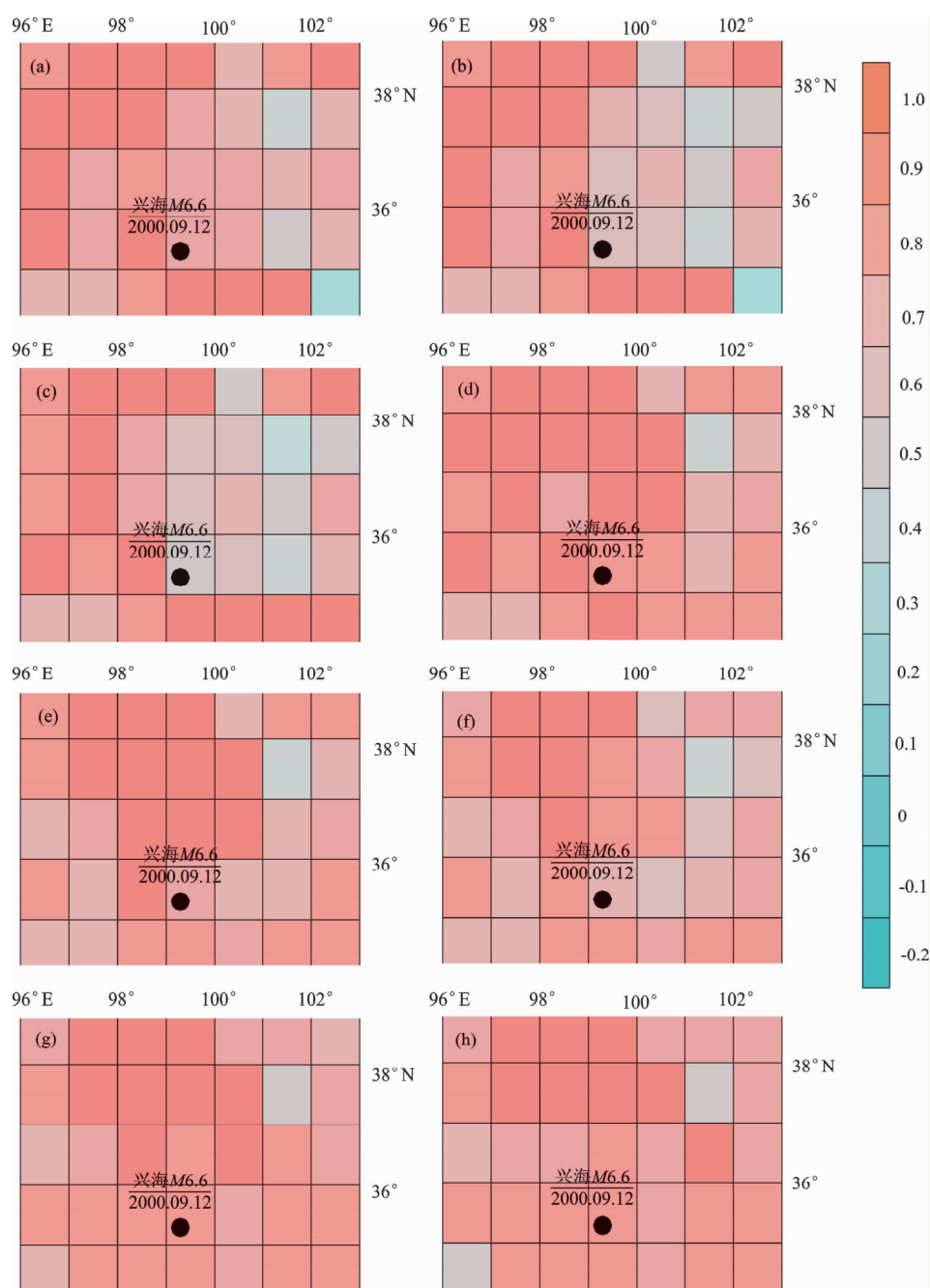


图 3 2000 年兴海 6.6 级地震及周边区域地震拟合优度空间分布演化图

(a) 1999-01; (b) 1999-02; (c) 1999-05; (d) 1999-10; (e) 1999-12;
(f) 2000-02; (g) 2000-08; (h) 2000-10

Fig. 3 The evolution map about the spatial distribution of the goodness of fit of earthquakes in the surrounding area of the epicenter of Xinghai $M_s 6.6$ earthquake in 2000

这 2 次地震前尽管拟合优度值的空间分布演化图像并不完全相同, 其中门源 6.4 级地震发生在低值区扩张之后, 而兴海 6.6 级地震则发生在低值区扩张—收缩之后, 但这 2 次地震前均出现了震源区附近拟合优度值的低值区, 且低值区有扩张和收缩的变化过程。这 2 次地震前拟合优度不同的空间演化图像, 可能与 2 次地震不同的地质构造和孕震过程有关。

值得注意的是, 这 2 次地震的震中均不在拟合优度等值线图中最低值区域内, 兴海地震发生在低值区的边缘, 而门源地震则发生在 2 个相对低值区的中间。

4 结果分析

综合以上结果分析, 2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震发生前一段时间, 在震源区及其周边区域地震拟合优度确实发生了明显的下降。从时间上看, 2015 年 11 ~ 12 月, 地震拟合优度曲线在 2013 年 10 月发生突降后持续低值的基础上, 2015 年 11 ~ 12 月再次出现明显的下降, 直至发震, 震后回升; 从空间上看, 2013 年 10 月起低值区扩张, 并逐渐分化成 2 个, 从 2015 年 11 月低值区扩张, 12 月 2 个低值区继续扩张并合并, 震源附近的拟合优度值持续降低, 直到发震。2000 年兴海 6.6 级地震和 1986 年门源 6.6 级地震前, 地震拟合优度在震源区附近也出现过明显的低值区, 且低值存在扩张和收缩的变化过程。青海省多个中强地震前震中附近区域的地震拟合优度空间分布都出现了低值区的扩张—收缩的变化过程。

这些现象都显示了震前一段时间在震源附近区域确实发生了由于孕震而应力积累的过程。该积累过程导致了震源区及其周边区域的次级破裂出现明显的不均匀, 这种不均匀即表现为中小地震的比例失调, 从而使得地震拟合优度出现了显著的下降。地震多发生在拟合优度低值区的边缘或 2 个相对低值区之间, 表明中强以上地震的孕震区域, 并不一定是以震中为中心展开的, 分析可能是震前在一个较大范围区域内发生应力的明显积累, 最终在结合相对薄弱的部位以地震的形式发生应力释放。

时间尺度的分析还显示, 当门源周边 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 区域内地震拟合优度发生明显下降并低值持续超

过 6 个月后, 震中 500 km 范围内则有 $M_s \geq 6.0$ 地震发生。

5 结论和讨论

通过对 2016 年门源 6.4 级地震震中及周边区域进行地震拟合优度的时间和空间扫描计算结果进行研究分析, 可以得出如下结论:

(1) 门源 6.4 级地震发生前, 震中周边 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 区域内, 地震拟合优度发生了明显的下降并低值持续, 震前再次发生下降。该区域以往地震拟合优度发生明显下降并低值持续超过 6 个月后, 震中周边大多有中强地震发生。

(2) 门源 6.4 级地震震中及周边区域的地震拟合优度空间分布在震前 27 个月内变化明显, 特别是震前 2 个月内, 低值区扩张并合并, 震中附近的拟合优度值下降, 直到发震, 震后基本恢复。2000 年兴海 6.6 级地震则是发生在地震拟合优度低值区扩张—收缩之后。

(3) 地震不是发生在震前拟合优度最低值的区域, 而是位于低值区的边缘或 2 个低值之间。由此可见, 地震拟合优度的空间演化图像只能为未来震中位置的判定提供参考性的依据, 对震中位置的判定需要根据异常区域的地质构造条件并结合周边的前兆数据变化情况以及其他测震学指标加以综合分析而得出。

本文研究过程中也存在着一些问题: 首先, 地震均没有发生在地震拟合优度最小的区域内, 而是发生在低值区的边缘或 2 个低值区的中间, 这一现象是普遍规律还是部分地震特有的现象, 需要进一步进行探讨和研究。其次, 本文中所使用的地震目录为青海省地震局预报中心提供的青海省小震目录, 计算结果显示出明显的异常。笔者同时也用测震台网共享的目录进行了相同参数、相同方法的计算, 结果却不理想。这可能也是本文中的空间扫描的研究区域无法完全以震中为中心的原因。

参考文献:

- 杜娟, 马建新. 2012. 玉树 7.1 级地震前地震拟合优度异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 33(2): 15–20.
- 段玉石, 路鹏, 林玮. 2010. 震级频度偏离 G-R 关系前兆含义的震例研究[J]. 地震工程与工程振动, 30(6): 32–37.
- 桂荣, 黄瑜. 2006. 新疆中强地震前 G-R 关系式拟合优度变化特征

- [J]. 内陆地震, 20(1): 65 – 72.
- 郭德科, 胡风英, 李炳文等. 2003. 中强地震前地震拟合优度的异常特征及在地震预报中的应用[J]. 地震研究, 26(4): 315 – 320.
- 李滔, 马建新, 孙丽等. 2009. 地震拟合优度在青海中强地震预报中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 30(2): 31 – 37.
- 李滔, 马建新. 2008. 地震拟合相关系数在青海地区地震预报中的应用[J]. 西北地震学报, 32(2): 184 – 188.
- 李志雄, 张国民, 傅征祥等. 1996. 中强地震前地震频次—震级关系式拟合优度变化的研究[J]. 中国地震, 12(3): 229 – 236.
- 陆远忠, 李胜乐, 邓志辉等. 2002. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都: 成都地图出版社.
- 马建新, 李滔. 2010. 大柴旦 6.6 级地震前的地震拟合相关系数异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 22(2): 25 – 31.
- 马建新, 马辉青, 李滔. 2014. 中国大陆中强地震前的地震拟合优度异常特征研究[J]. 地震地磁观测与研究, 31(3/4): 71 – 76.

Research on Goodness of Earthquake Fit Anomaly before Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

LI Tao¹, ZHONG Weixing²

(1. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

(2. Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China)

Abstract

The time and space scanning calculation of the goodness of earthquake fit was done in the epicenter of 2016 Menyuan $M_s6.4$ earthquake and its adjacent area by the principle of $G - R$ formula. The time scanning results show that the goodness of earthquake fit values were decreased significantly and continued to keep the lower value in the epicenter and its adjacent area in 27 months before the earthquake, then the value has been significant decreased again within two months before the earthquake. The space scanning results show that the distribution of goodness of earthquake fit contours have significant changes in the epicenter and its adjacent area before the earthquake and two adjacent low-value zone have expansion and consolidation, the goodness of fit value decreased significantly in epicenter region and the entire study area. All of these results show that the accumulation of the stress in the seismogenic process leads to the imbalanced proportion of the small and large earthquakes before the earthquake, so that the goodness of fit values appear low values in the epicenter and its adjacent area.

Key words: $G - R$ formula; goodness of earthquake fit; Menyuan earthquake; time and space scanning