

2016 年青海门源 M_s 6.4 地震余震序列参数 稳定性分析*

余 娜, 张晓清, 袁伏全

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 采用时间序列的“传染型余震序列”(ETAS)模型和最大似然法, 对 2016 年 1 月 21 日门源 M_s 6.4 地震序列参数进行估计。选用截止震级 $M_c = M_L 1.0$ 对门源地震余震序列整体的参数进行连续滑动拟合。结果表明: 在主震发生后的早期阶段, α 值有明显的不稳定变化, 震后 3 天稳定在 1.0 ~ 1.4; p 值在震后第 1 ~ 6 天由 0.98 逐渐上升到 1.77, 其后逐渐下降到 1.42, 最后相对稳定在 1.1 ~ 1.3; b 值则在震后早期有缓慢升高的变化, 但变化幅度不大, 由 0.77 增至 0.82, 其后稳定在 0.81 ~ 0.82。门源 M_s 6.4 地震后的早期阶段震源区的应力积累水平逐渐减弱, 在序列衰减逐渐减缓的过程中, 伴随着激发次级余震能力减弱的现象。

关键词: ETAS 模型; 余震序列; 稳定性分析; 门源 M_s 6.4 地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)增刊 1-0062-07

0 引言

中强地震发生后, 不同构造区域、序列类型、主震的震源机制类型、震源区局部构造应力水平以及大地热流等地球物理特征都可能表现为序列参数的显著差异 (Kagan *et al.*, 2010), 且余震序列的衰减特征和激发余震的能力可通过序列的统计参数来表征, 因此, 获得准确可靠的地震序列参数对快速判定地震序列类型、研究震源区特征和评估后续地震危险性均具有重要的参考价值 (蒋海昆等, 2007; Guo, Ogata, 1997), 这也是强震后政府和社会最为关注的问题之一。目前国际上采用时间序列的“传染型余震序列”(Epidemic Type Aftershock Sequence, 简称 ETAS) 模型 (Ogata, 1988, 1989; Zhuang, 2011) 计算地震序列参数得到广泛的认可, 拟合得到的地震序列参数中 α 值和 p 值对地震序列的研究有重要意义。

由于地震序列的复杂性, 截止震级的选取、震后早期阶段震源区应力场的调整等均影响地震序列参数并可能引起其变化 (蒋长胜等, 2013a, b, 2014; Wang *et al.*, 2010), 这对震后快速、准确获取地震序列参数带来较大挑战。因此, 强震

发生后, 必须选取合理的截止震级, 利用 ETAS 模型计算其序列参数。本文采用滑动拟合, 考察 ETAS 模型参数的动态变化, 判断门源 M_s 6.4 地震后早期阶段激发余震的能力和震源区应力积累水平。

1 资料选取和序列完整性分析

2016 年 1 月 21 日在全新世活动的冷龙岭断裂附近发生门源 M_s 6.4 地震。该断裂为左旋走滑兼逆断断裂, 断裂走向近 NW, 由一组近乎平行的次级断裂组成, 其西段活动年代为晚更新世晚期 (何文贵等, 2000)。图 1 给出了门源 M_s 6.4 地震序列及其周围地震分布情况。本文选取分布相对集中在 ($36.00^\circ \sim 38.50^\circ \text{N}$, $100.00^\circ \sim 103.00^\circ \text{E}$) 内的地震事件作为研究对象。地震事件基本参数使用了中国地震台网中心“全国地震编目系统”提供的《全国统一正式目录》, 选用 2016 年 1 月 1 日至 4 月 25 日 0.0 级以上的地震用于地震序列完整性分析。

在实际的地震序列选取中, 为降低不同算法的人为主观性, 本文参照蒋长胜等 (2014) “自然边界法”的做法, 采用纬度-时间图、经度-时

* 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 2016 年度震情跟踪定向任务“青海地区地震序列参数的早期特征研究”(2016010133) 资助。

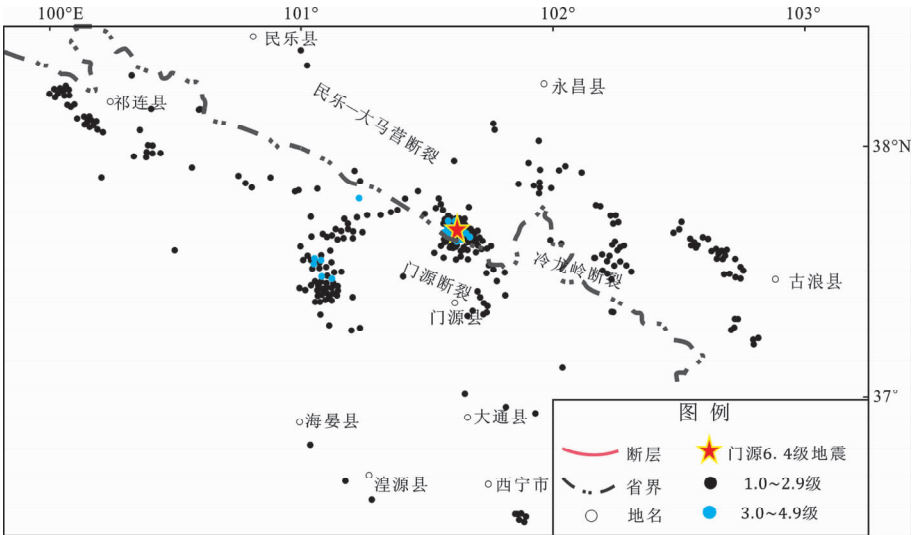


图 1 门源 $M_s6.4$ 地震序列空间分布图
Fig. 1 Spatial distribution of the Menyuan $M_s6.4$ earthquake sequence

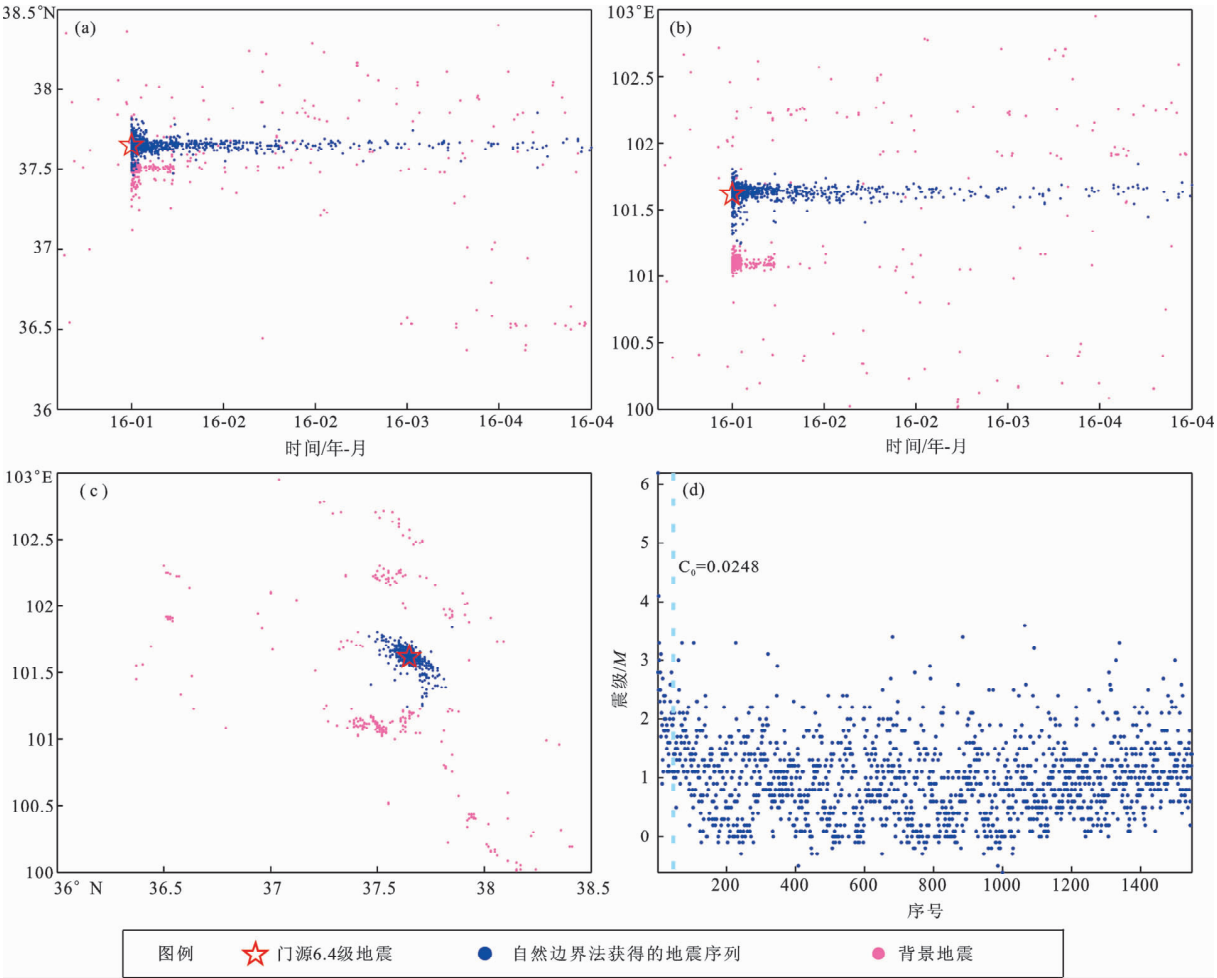


图 2 门源 $M_s6.4$ 地震序列目录的完整性分析
(a) 纬度 - 时间图; (b) 经度 - 时间图; (c) 空间分布图; (d) 震级 - 序号图
Fig. 2 Catalogue completeness analysis for the Menyuan $M_s6.4$ earthquake sequence
(a) latitude - time plot; (b) longitude - time plot; (c) spatial distribution plot ; (d) magnitude - rank plot

间图及震中分布图相结合的方式,根据地震时空的自然边界选取地震序列,选取过程如图 2 所示。由于在一些强震发生后的短时间内,主震的波形振幅较大、面波等波列持续时间较长等原因,可能会发生大量的震级小的余震被“淹没”以及余震区甚至更大范围内的地震监测能力显著降低(Akaike, 1974)的现象。为确保地震序列的完整性,研究中采用“震级-序号”法(Huang, 2006; 蒋长胜等, 2014; Zhuang *et al*, 2012)进行定性讨论,“震级-序号”法按地震发生时间的先后顺序排序,地震密度较大的区域的连线大致为 M_c 的时序变化。在主震发生后的 0.024 8 天,序列的完整性震级 $M_c = M_L 1.0$ 。根据上述时空选取方法,得到序列中 $M_L 1.0 \sim 1.9$ 的地震 639 个、 $M_L 2.0 \sim 2.9$ 的地震 119 个、 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 的地震 15 个、 $M_L 4.0 \sim 4.9$ 的地震 1 个,无 5.0 级以上的余震。

2 序列 ETAS 模型拟合情况

2.1 时间序列 ETAS 模型

目前国际上对地震序列参数计算主要采用了时间序列的 ETAS 模型(Ogata, 1988, 1989; Zhuang, 2011)。假设所有的余震均可按照“大森-宇津”公式(Omori, 1894; Utsu 1961)激发自己的余震

$$f(t) = \mu + k/(t+c)^p. \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 为 t 时刻的余震发生率, t 为主震发生后的离逝时间, μ 为背景地震的发生率, p 表示余震序列衰减的快慢, c 为主震后余震频次达到峰值时所对应的时间, k 用于描述余震的活跃程度。

实际的地震序列活动往往比较复杂,强余震常会伴有比自己更高阶的余震发生,部分地震序列也不完全按修正的 Omori 公式衰减,地震序列受激发次级余震的影响出现较大的起伏活动。为解决每个余震都可激发次级余震的情况,Ogata (1988, 1989, 2001)将自相似思想引入修正的大森公式,提出了 ETAS 模型,并对其参数及其模型进行了系统研究。ETAS 模型假定余震遵从 Omori-Utsu 公式激发自己的余震,且震级的分布是独立的,主震的发生为初始零时刻,在其后的一个

观测时间段 $[0, T]$ 内的地震序列 $\{(t_i, M_i); i = 1, 2, \dots, N\}$ 的强度函数可表示为(Ogata, 1988)

$$\lambda(t) = \mu + k \sum_{t_i < t} \frac{e^{\alpha(M_i - M_0)}}{(t - t_i + c)^p}. \quad (2)$$

其中, M_i 和 t_i 分别表示第 i 个事件的震级和发生时间; M_0 为参考震级,一般可取截止震级, $M_i > M_0$ 。 p 与修正的“大森-宇津”公式中的 p 有相同的物理含义,表示序列衰减的快慢, p 越大衰减越快。 α 表示触发次级余震的能力,对于震群型序列,一般情况下 $\alpha < 1$,而当地震序列中无明显的被激发的次级余震时, α 一般大于 1(Ogata, 2001)。

2.2 ETAS 模型参数的最大似然估计和残差分析

ETAS 模型参数一般使用最大似然法进行估计。在拟合时间 $[S, T]$ 范围内,其中 $0 < S < T$,似然函数 L 的形式为

$$\lg L = \sum_{i: S \leq t_i < T} \lg \lambda(t_i) - \int_S^T \lambda(t) dt. \quad (3)$$

即可对 ETAS 模型参数 $[\mu, k, c, \alpha, p]$ 进行最大似然估计。

中强地震发生后,尽快获得可靠的地震序列参数在判断地震序列类型的时效性方面有重要的现实意义。对于门源 $M_s 6.4$ 地震序列参数早期特征的考察,选定了 2016 年 1 月 21 日至 2 月 16 日 $M_L \geq 1.0$ 的地震目录,设定参数拟合时段为震后第 0.024 8 ~ 26.28 天,进行 $M_c = M_L 1.0$ 下的 ETAS 模型参数的最大似然估计。图 3 给出了利用 ETAS 模型拟合的门源 $M_s 6.4$ 地震序列的条件强度曲线,其中参数 $\mu = 0.000$, $k = 0.030 2$, $c = 0.014 4$, $\alpha = 1.402 6$, $p = 1.303 5$ 。由图 3 可见,在震后 26.28 天内,较大余震事件引起的条件强度曲线变化较为明显。

为检验 2016 年门源 $M_s 6.4$ 地震序列 ETAS 模型的拟合效果,使用“转换时间”域的“残差分析”法(Ogata, 1988),可将时间上复杂的地震序列 $\{t_i\}$ 转化为服从单位速率的稳态泊松分布 $\{\tau_i\}$ (Utsu, 1961),并在“转换时间”域 $\{\tau\}$ 进行拟合效果分析,考察实际地震序列和理论值的拟合情况:

$$t \mapsto \tau = \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u) du. \quad (4)$$

如果在残差分析中, 转换时间域的累计频次近似直线, 并与理论曲线较为接近, 则拟合效果较好 (Zhuang *et al.*, 2012)。由图 4 给出的门源地震序

列累计地震数与 ETAS 拟合曲线在转换时间域的比较可见, 在研究时段内地震序列累计地震数与 ETAS 模型拟合曲线较为接近, 拟合效果较理想。

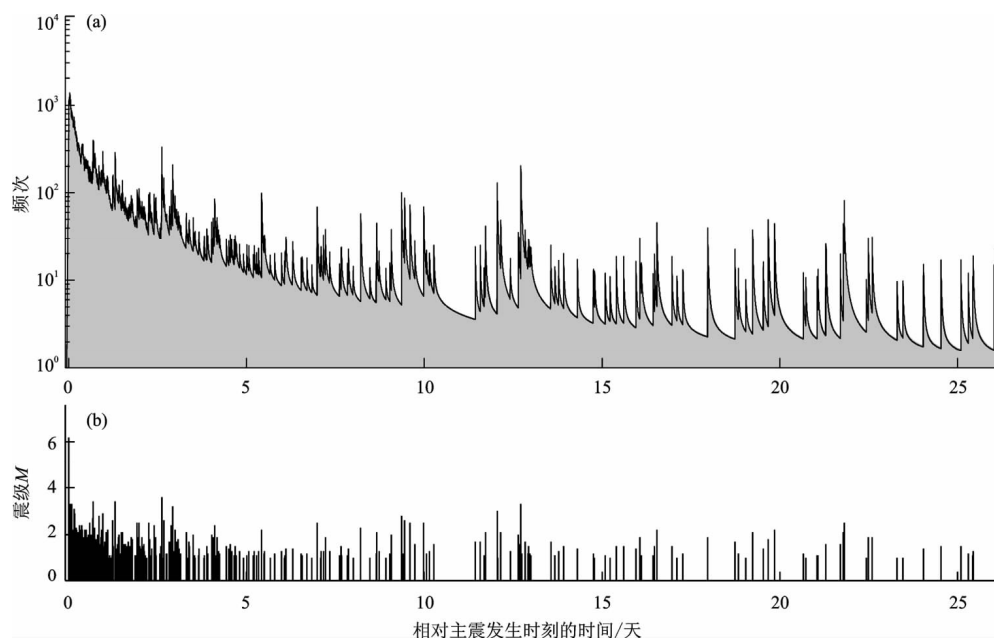


图 3 利用 ETAS 模型拟合 $M_L \geq 1.0$ 地震的条件强度曲线 (a) 和 $M-t$ 图 (b)

Fig. 3 Conditional intensity curve of $M_L \geq 1.0$ earthquakes fitted by the ETAS model (a) and $M-t$ plot (b)

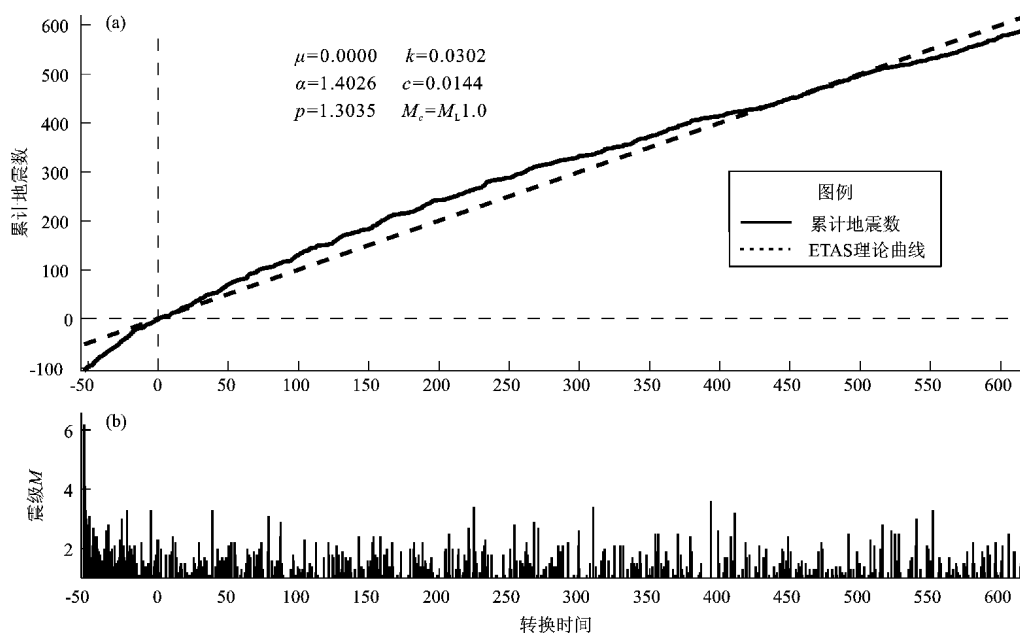


图 4 利用 ETAS 模型对 $M_L \geq 1.0$ 地震的拟合情况

(a) 累计地震数与 ETAS 拟合曲线在“转换时间”(τ) 域的比较;

(b) $M-\tau$ 图, τ 为将时间转换为稳态泊松分布的“转换时间”

Fig. 4 Fitting situation of $M_L \geq 1.0$ earthquakes based on ETAS model

(a) comparison of cumulative earthquake number and ETAS fitting curve in transformed time (τ) domain;

(b) $M-\tau$ plot, in which τ is the transformed time which is according to the stationary Poisson process

3 序列 ETAS 模型参数稳定性分析

利用 ETAS 模型进行连续、滑动拟合,考察模型参数随序列持续时间变化的稳定性。地震序列参数中的 α 值代表激发次级余震的能力, α 值大则代表产生次级余震的能力弱,反之则强; p 值代表序列衰减水平, p 值大表示衰减的快,反之则衰减慢; b 值表示余震区的应力积累状态。

在使用 ETAS 模型对门源 $M_s6.4$ 地震序列进行连续、滑动拟合中,将拟合时间窗的起始时刻固定为 0.024 8 天,序列持续时间 t_2 以 1 天为步长,自主震后 1 天增加至 26.28 天,进行时间窗滑动模型参数拟合,获得 α 、 b 和 p 值随序列持续时间 t_2 的变化(图 5)。由图 5 可见, α 值在震后早期的第 1~3 天变化较为剧烈,之后相对稳定在 1.0~1.4,到震后第 25 天出现突增现象,其后回到之前相对稳定的范围; p 值在震后第 1~6 天的序列早期阶段出现上升—下降—趋于稳定的现象,自

0.98 逐渐上升到 1.77,再逐渐下降到 1.42,其后相对稳定在 1.1~1.3; b 值则在震后早期有缓慢升高的变化,但变化幅度不大,由 0.77 增至 0.82,其后稳定在 0.81~0.82。

从图 5 可以看出,拟合参数 α 、 b 和 p 值相互之间的时间变化特性,如果不考虑主震后第 1~2 天 α 值误差较大、数值较高,其他时段 α 值和 p 值呈反比例关系,即随着序列持续时间的增加, α 值增加则 p 值降低。由此表明,在门源 $M_s6.4$ 地震序列从衰减到逐渐减缓的过程中,伴随着激发次级余震能力减弱的现象。其次,随着序列持续时间的增加, b 值有趋势性升高的序列早期特征, p 值在主震后 1~3 天上升变化,其后时段出现相反的下降变化特征。上述分析表明,主震后的早期阶段震源区的应力积累水平逐渐减弱,在主震后前 3 天序列衰减速度较快,其后序列缓慢衰减。最后, b 值在震后早期有缓慢升高的变化, α 值在震后 2 天内与 b 值呈短暂的成正比关系,其他时段不稳定变化,二者间无明显的规律性关系。

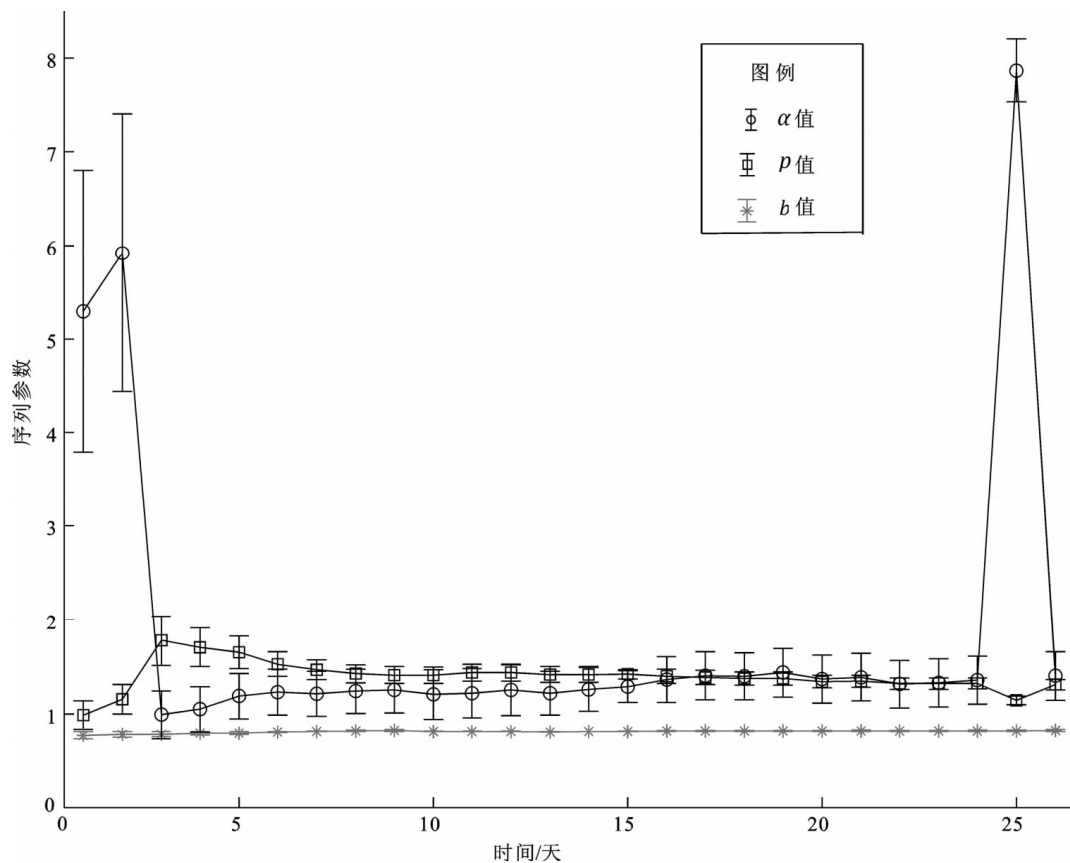


图 5 ETAS 模型参数 α 、 p 和 b 随拟合截止时间的变化

Fig. 5 Parameters α , p and b varied with the end time in ETAS fitting

4 结论

本文根据中强地震震情跟踪需要, 研究门源 $M_s6.4$ 地震序列发展过程中 ETAS 模型参数的连续变化特征, 开展了 ETAS 模型参数连续、滑动拟合。采用“自然边界法”选取地震序列, 确定序列的完整性震级, 并利用最大似然法对地震序列参数进行拟合研究, 获得了如下认识:

(1) 选用截止震级 $M_c = M_L1.0$ 、拟合起始时间 $C_0 = 0.024\ 8d$ 的拟合结果表明, 门源 $M_s6.4$ 地震序列 ETAS 模型参数 $\mu = 0.000$, $k = 0.030\ 2$, $\alpha = 1.029$, $b = 0.747$ 和 $p = 1.667$ 。比较蒋海昆等 (2006, 2007) 给出的中国大陆 294 次 5.0 级以上中强余震序列 ETAS 模型拟合参数, 发现门源 $M_s6.4$ 地震余震序列参数 b 值低于上述文献研究的相同区域 (西北地区)、主震类型和主震震级的平均结果; p 值明显高于上述文献研究结果, 表明门源地震序列衰减速率较快; α 值高于玉树地震序列 ($\alpha = 0.948\ 2$) 的结果, 显示了门源 $M_s6.4$ 地震序列在震后早期阶段的触发次级余震的能力比玉树 $M_s7.1$ 地震激发次级余震的能力弱。

(2) 对门源 $M_s6.4$ 地震序列 ETAS 模型参数的连续、滑动拟合结果表明, α 值在震后早期的第 1~3 天期间变化较为剧烈, 由较高的 5.9 急速降至 0.9, 之后相对稳定在 1.0~1.4; p 值在震后早期的第 1~6 天自 0.98 逐渐上升到 1.77, 然后下降到 1.42, 其后相对稳定在 1.1~1.3; b 值缓慢升高, 但变化幅度不大, 由 0.77 增至 0.82, 其后稳定在 0.81~0.82。此外, 如果不考虑主震后第 1~2 天 α 值误差较大、数值较高, α 值与 p 值总体呈现反比例变化; b 值与 p 值也呈反比例关系; α 值与 b 值没有明显的相关性。由此表明, 门源 $M_s6.4$ 地震序列在衰减逐渐减缓的过程中, 伴随着激发次级余震的能力减弱、震源区应力积累水平减小的现象。

参考文献:

何文贵, 刘百麓, 袁道阳等. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究

[J]. 西北地震学报, 22(1): 90~97.

蒋长胜, 韩立波, 郭路杰. 2014. 新疆于田地区 2008 年以来 3 次地震序列参数的早期特征[J]. 地震学报, 36(2): 165~174.

蒋长胜, 吴忠良, 韩立波等. 2013a. 地震序列早期参数估计和余震概率预测中截止震级 M_c 的影响: 以 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震为例[J]. 地球物理学报, 56(12): 4048~4057.

蒋长胜, 庄建仓, 龙锋等. 2013b. 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震序列参数的早期特征: 传染型余震序列模型计算结果[J]. 地震学报, 35(5): 661~669.

蒋海昆, 曲延军, 李永莉等. 2006. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. 地球物理学报, 49(4): 1110~1117.

蒋海昆, 郑建常, 吴琼等. 2007. 传染型余震序列模型震后早期参数特征及其地震学意义[J]. 地球物理学报, 50(6): 1778~1786.

Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Trans Automat Control, 19(6): 716~723.

Guo Z, Ogata Y. 1997. Statistical relations between the parameters of aftershocks in time, space, and magnitude[J]. J Geophys Res, 102(B2): 2857~2873.

Huang Q. 2006. Search for reliable precursors: A case study of the seismic quiescence of the 2000 western Tottoriprefecture earthquake[J]. J Geophys Res, 111(B4): 170~176.

Kagan Y Y, Bird P, Jackson D D. 2010. Earthquake patterns in diverse tectonic zones of the globe[J]. Pure Appl Geophys, 167(6): 721~741.

Ogata Y. 1988. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for pointprocesses[J]. J Amer Statist Assoc, 83(401): 9~27.

Ogata Y. 1989. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residualanalysis[J]. Tectonophysics, 169(1): 159~174.

Ogata Y. 2001. Increased probability of large earthquakes near aftershock regions with relativequiescence[J]. J Geophys Res, 106(B5): 8729~8744.

Omori F. 1894. On aftershocks of earthquakes[J]. J Coll Sci Imp Univ Tokyo, 7: 111~200.

Utsu T. 1961. A statistical study of on the occurrence of aftershocks[J]. Geophys Mag, 30: 521~605.

Wang Q, Jackson D D, Zhuang J C. 2010. Missing links in earthquake clustering models[J]. Geophys Res Lett, 37(21): 620~626.

Zhuang J C. 2011. Next-day earthquake forecasts for the Japan region generated by the ETASmodel[J]. Earth Planets Space, 63(3): 207~216.

Zhuang J, Harte D, Werner M J, et al. 2012. Basic models of seismicity: temporal models[G]//Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis.

Stability of Parameters of Aftershock Sequence of Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

YU Na, ZHANG Xiaoqing, YUAN Fuquan

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

Abstract

Using time series “epidemic type aftershock sequence” (ETAS) model and the maximum likelihood method, we estimate the parameters of aftershocks sequence of the Menyuan $M_s6.4$ earthquake on Jan. 21, 2016, and then select the cutoff magnitude $M_C = M_L + 1.0$ to do continuous sliding fitting on these parameters. The result shows the α value changed unstable in the early stage after the main shock, then it was stable in the range of 1.0 ~ 1.43 days after the mainshock. The p value increased gradually from 0.98 to 1.77 within 1 ~ 6 days after the mainshock and then gradually decreased to 1.42, and finally remained steady at 1.1 ~ 1.3. And the b value increased from 0.77 to 0.82 in the early stage after the mainshock, and then remained steady at 0.81 ~ 0.82. The stress accumulation level was gradually weakened in the focal area in the early stage after the main shock, and in the process of gradually slowing down the aftershock attenuation, there appeared a weak triggering ability in generating secondary aftershocks.

Key words: epidemic type aftershock sequence model; aftershocks sequence; stability analysis; Menyuan $M_s6.4$ earthquake