

2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列参数的早期特征^{*}

郭路杰, 蒋长胜, 韩立波

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 利用“传染型余震序列”(ETAS)模型, 考虑不同的截止震级和序列持续时间的影响, 对 2014 年鲁甸 6.5 级地震后 9 d 内的序列参数特征进行了研究。结果表明, 当选取截止震级 $M_c = M_L 2.0$ 时, 可获得相对稳定可靠的 p 值和 α 值等序列参数, 其中 $p = 0.89 \sim 1.10$, 显示了较慢的衰减特征, α 值在震后 5.0 d 出现大幅下降, 表明激发次级余震的能力出现显著变化。

关键词: 地震序列; ETAS 模型; 截止震级; 云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)04-0503-05

0 引言

据中国地震台网测定, 2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分在云南省昭通市鲁甸县 (27.1°N , 103.3°E) 发生 $M_s 6.5$ 地震, 并造成人员重大伤亡。地震发生后, 关于此次地震序列类型、序列参数和是否发生强余震等问题引起广泛关注。

由于地震序列参数尤其是参数的早期特征, 对序列类型快速判定 (Guo, Ogata, 1997; 蒋海昆等, 2007)、研究震源区构造应力水平和区域大地热流值 (Kagan *et al.*, 2010) 等有重要参考意义。因此, 在强震后获得科学、准确的地震序列参数具有重要的现实意义。近年来, 基于点分支过程的“传染型余震序列”(ETAS)模型得到持续发展, 由于可接近真实地描述余震序列活动, ETAS 模型在地震序列参数早期特征研究中发挥了重要作用。

为研究云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震序列参数早期特征, 本文考虑了不同的截止震级、序列持续时间的影响, 获得了云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震序列的 ETAS 模型参数, 以期对此次地震的序列类型判定等提供参考。

1 ETAS 模型及其参数估计方法

作为修正的“大森—宇津”公式 (Omori,

1894; Utsu, 1961) 的推广, ETAS 模型假设所有的余震均可激发自己的余震, 且相互独立, 被用于对接近真实地震序列的模拟 (Ogata, 1988):

$$\lambda(t) = \mu + K \sum_{t_i < t} \frac{e^{\alpha(M_i - M_0)}}{(t - t_i + c)^p}, \quad M_i > M_0. \quad (1)$$

式中, M_i 和 t_i 分别为事件 i 的震级和发生时刻, M_0 为参考震级, 一般取为截止震级。 p 值表示序列衰减的快慢, p 值越大衰减越快, 反之越慢。 α 值用于描述触发次级余震的能力 (Ogata, 1989, 1992)。

ETAS 模型参数可用最大似然法进行估计, 利用在时间段 $[t_c, T]$ 内的似然函数:

$$\lg L = \sum_{i: S \leq t_i < T} \lg \lambda(t_i) - \int_{S}^T \lambda(t) dt. \quad (2)$$

即可对 ETAS 模型参数 $[\mu, K, c, \alpha, p]$ 进行估计。为对 ETAS 模型的拟合效果进行评估, 这里使用了“转换时间”域的“残差分析”方法 (Ogata, 1988; Daley, Vere-Jones, 2003)。“残差分析”方法的基本原理是: 条件强度曲线 $\lambda(t)$ 逐点积分后即为单调递增函数:

$$t \mapsto \tau = \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u) du. \quad (3)$$

根据随机点过程理论, 这一积分结果可成为稳态

^{*} 收稿日期: 2014-08-24.

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAK15B01, 2012BAK19B01)、国际科技合作项目 (2012DFG20510) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (DQJB13B19) 联合资助。

泊松过程。由此,可通过积分转换,将时间序列 $\{t_i\}$ 逐点变换为“转换时间” $\{\tau_i\}$,并通过判断“转换时间”域 $\{\tau_i\}$ 下的实际地震序列累积地震数是否接近直线判断模型的拟合效果 (Zhuang *et al.*, 2012)。

2 资料的选取和地震序列的完整性分析

本研究使用的鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列目录来自中国地震台网中心“全国地震编目系统”提供的《云南地震台网速报目录》^①,选定 2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分 11 秒至 8 月 12 日 16 时 17 分 4.8 秒,空间范围为 $(26.8^\circ \sim 27.4^\circ \text{N}, 103^\circ \sim 103.4^\circ \text{E})$ 的地震目录作为序列目录。在云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震震后 9 天内,目录中共包括 $M_L \geq 4.0$ 地震 5 次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震 41 次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震 263 次, $M_L 1.5 \sim 1.9$ 地震 340 次。

由于大地震之后,受主震面波振幅较强、余震大量集中发生等因素影响,余震区的地震监测能力会出现短暂的显著下降 (Iwata, 2008)。为确保地震序列参数计算的可靠性,这里使用了震级—序号方法 (Huang, 2006; 蒋长胜, 吴忠良, 2011; Zhuang *et al.*, 2012) 对鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列目录进行完整性分析,结果如图 1 所示,图中红色五角星代表主震的位置,两条垂直虚线分别标出了截止震级为 $M_L 2.0$ 和 $M_L 1.5$ 时地震目录完整的位置,即分别为 $C_0 = 0.0317 \text{ d}$ 和 $C_0 = 0.2519 \text{ d}$ 。在利用震级—序号图考察完备震级时,一方面需考察图中地震事件分布的下包络线,即记录的最小震级;另一方面,需确保所选定的“完整震级”起始位置之后的地震,在震级—序号图中连续、无缺失地分布,由此方可获得地震序列目录完整的起始位置 C_0 。由图 1 可见,完整性震级由主震发生后的 $M_L 2.5$ 逐渐降低至 $M_L 0.8$ 左右,反映了余震序列监测能力逐渐提升的过程。当截止震级 $M_c = M_L 2.0$ 和 $M_c = M_L 1.5$ 时, C_0 可分别选定为主震后 0.0317 d 和 0.2519 d。

笔者为从不同角度考察鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列参

数的早期特征,分别考察 ETAS 模型的参数。

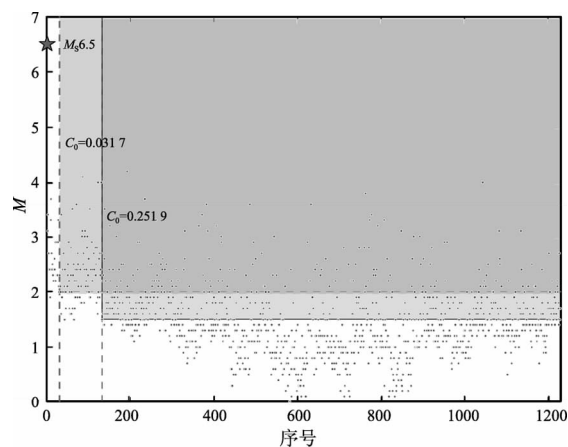


图 1 云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列目录的震级—序号图

Fig. 1 Magnitude-order diagram of the Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

3 地震序列参数

在利用 ETAS 模型对地震序列参数进行分析时,需在“转换时间”域进行“残差分析”。如在残差分析中,转换时间域的累积频次近似为直线,并与理论曲线较为接近,则拟合效果较好。为测试鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列目录对 ETAS 模型的拟合情况,图 2 和图 3 分别给出了主震之后 0~9 d、 $C_0 = 0.0317 \text{ d}$ 、截止震级 $M_c = M_L 2.0$ 时的残差分析和条件强度曲线情况。

图 2a 给出了鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列累积地震数与 ETAS 拟合曲线在“转换时间”域 $\{\tau\}$ 的比较。由图可见,在“转换时间”域 $\{\tau\}$ 下,实际地震数目的累积曲线接近一条直线,与理论的稳态泊松过程 (图中黑色虚线) 较为接近。由此表明,在相应的计算参数设置下,鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列可被 ETAS 模型较好地描述。在图 2b 给出的 $M-\tau$ 图可见,在经过转换后,地震序列的时间 $\{t\}$ 已被逐个变换为“转换时间”域的时间序列 $\{\tau\}$,从 $\{\tau\}$ 的时间分布特征上,原有的地震序列 $\{t\}$ 从震后密集发生的丛集特征已转换为间隔随机分布的稳态泊松过程。

^① 全国统一地震编目 (日报) 查询系统, http://www.csndmc.ac.cn/newweb/catalog_direct_link.htm#, 查阅时间 2014 年 8 月 16 日。

图3a给了ETAS模型的条件强度曲线,即单位时间内地震发生率随时间的变化情况。由于ETAS模型考虑了余震激发次级余震的情况,图中显示了在接近震后5d和7d时,次级余震活动所引起的地震发生率的显著变化。图3b显示了序列原始的 $M-t$ 图。上述图2a和图3a中还标出了在

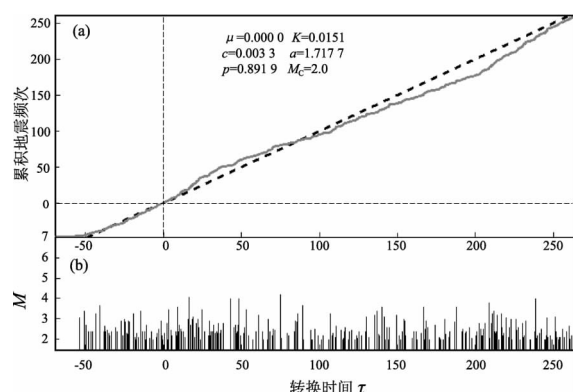


图2 利用ETAS模型对云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的“残差分析”

(a) 在“转换时间”(τ)域的ETAS拟合曲线与累积地震数的比较;(b) $M-\tau$ 图

Fig. 2 Residual analysis of the Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence by ETAS model

(a) cumulative numbers of earthquakes (the deep blue curve) against ETAS fitting curve in transformed time τ (the thick dashed line); (b) $M-\tau$ plot

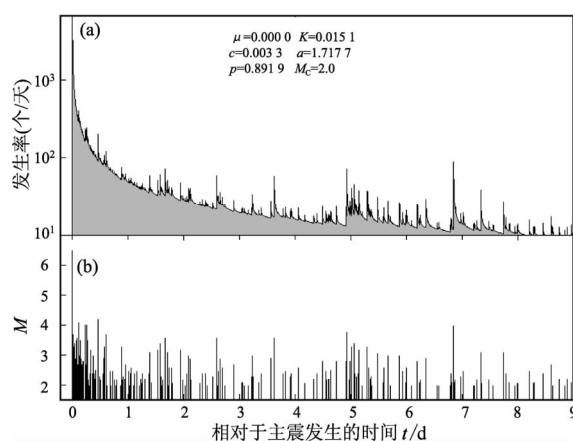


图3 利用ETAS模型拟合给出的云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列条件强度曲线

(a) 地震序列条件强度曲线;(b) $M-t$ 图

Fig. 3 Temporal evolution of the conditional intensity curve fitted by ETAS model to the Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

(a) conditional intensity curve of earthquake sequence; (b) $M-t$ plot

相应的 M_c 和 C_0 设置下,鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的ETAS模型参数。

地震序列参数与序列持续时间(蒋长胜等, 2013a, b, 2014)和截止震级 M_c 的选取有关(Sornette, Werner, 2005; Schoenberg *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010),为研究云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的早期参数特征,本文分别选用 $M_c = M_L2.0$ 与 $M_c = M_L1.5$ 以及相应的 $C_0 = 0.0317$ d与 $C_0 = 0.2519$ d,并对序列持续时间 $t = \{1.5, 2.0, 2.5, \dots, 9.0\}$ 进行ETAS模型拟合,计算获得的 p 值和 α 值分别如图4和图5所示,图中蓝色和绿色分别给出了 $M_c = M_L1.5$ 和 $M_c = M_L2.0$ 的结果,图中误差棒同时给出了 p 值的误差。

由图4可见,当 $M_c = M_L2.0$ 时, p 值随序列持续时间的变化较为稳定、误差较小,分布在0.89~1.10之间,总体较低,显示了序列较慢的衰减特征。当 $M_c = M_L1.5$ 时, p 值变化范围较大,在0.78~1.43之间。尽管截止震级较低、序列中的地震事件较多,但误差相比 $M_c = M_L2.0$ 时较大,表明了ETAS模型拟合的相对不稳定性。

由图5给出的 α 值随序列持续时间的变化可见,在 $M_c = M_L1.5$ 和 $M_L2.0$ 时, α 值均显示了随序列持续时间的增加而减小的变化趋势,尤其是在震后5d后出现大幅下降。对于 $M_c = M_L2.0$, α 值由3.76减小至1.67,在 $M_c = M_L1.5$ 时, α 值由3.10减小至0.46。 α 值在震后5d的剧烈变化,显示了云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列激发次级余震能力的显著变化,即由较弱变为相对较强。

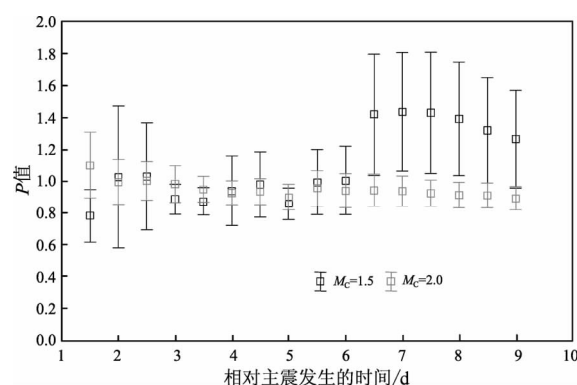


图4 ETAS模型 p 值随着不同截止震级和序列持续时间的变化

Fig. 4 The p values of ETAS model varied with the different cutoff magnitude and duration time of sequence

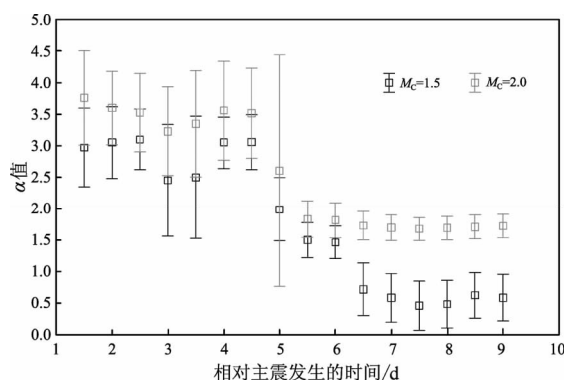


图5 ETAS模型 α 值随着不同截止震级和序列持续时间的变化

Fig. 5 The α values of ETAS model varied with the different cutoff magnitude and duration time of sequence

4 结论与讨论

本文利用 ETAS 模型,对云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震震后 0~9 d 的序列参数早期特征进行了考察。分别考虑截止震级 $M_c = M_L1.5$ 和 $M_c = M_L2.0$ 以及相应的序列起始时间 C_0 ,对震后序列持续时间 $t = \{1.5, 2.0, \dots, 9.0\}$ 天的 p 值和 α 值的演化进行了研究,获得了如下方面的认识:

(1) 当选取截止震级 $M_c = M_L2.0$ 时,云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列可获得相对稳定、可靠的 p 值和 α 值等序列参数。

(2) 当 $M_c = M_L2.0$ 时, p 值在震后 1.5~9.0 天内随序列持续时间的变化较为稳定,且数值较低, p 值分布在 0.89~1.10 之间,显示出较慢的衰减特征。

(3) 当 $M_c = M_L2.0$ 时, α 值在震后 5.0 d 后出现大幅下降,由主震后较高的 3.76 减小至 1.67,表明激发次级余震的能力出现显著变化。

为比较云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列参数早期特征,本文对同样采用 ETAS 模型获得的 2013 年四川芦山 $M_s7.0$ 地震(蒋长胜等, 2013b)、甘肃岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震(蒋长胜等, 2013a)、2014 年新疆于田地区 3 次地震序列(蒋长胜等, 2014)参数进行了对比。其中,2013 年四川芦山 7.0 级地震序列在主震后 10 d 内, $p = 0.93 \sim 1.24$,在震后 24 d 稳定在 1.22 左右;2013 年甘肃岷县—漳县 6.6 级地震在震后 1.678 d, $p = 1.15$;2008 年新疆

于田 $M_s7.3$ 地震序列在主震后 20 天内 $p = 1.15 \sim 1.30$;2012 年新疆于田 $M_s6.3$ 地震序列在主震后 20 d 内, $p = 1.16 \sim 1.19$;2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震序列在主震后 3.5 d 内 $p = 0.67 \sim 0.80$ 。对于 α 值,2013 年芦山 7.0 级地震序列在主震后 10 d 内, $\alpha = 2.47 \sim 2.10$;2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震序列在主震后 1.678 d, $\alpha = 1.70$;2008 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震序列在主震后 20 d 内, $\alpha = 1.01 \sim 1.30$;2012 年新疆于田 $M_s6.3$ 地震序列在主震后 20 d 内, $\alpha = 1.30 \sim 1.64$;2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震序列在主震后 3.5 d 内, $\alpha = 1.46 \sim 1.73$ 。

由上述比较可见,云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的 p 值仅高于 2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震序列,显示了序列较慢的衰减变化,而这种低 p 值、慢衰减的特征尽管不能排除后续发生强余震的可能,但受 p 值可能的区域特征所限,仍需对此次地震周边地区地震序列的比较来判断这种慢衰减是否属于余震活动的异常现象。 α 值未呈现随序列持续时间平稳变化的趋势,在震后 5 d 显著减小,表明激发次级余震的能力显著增强,这一点也可从震后 5 d 发生的 4.0 级余震相应的次级余震较为丰富上看出。 α 值的突然变化,可能表明在震后早期,余震区以主震的剩余能量释放为主、序列相对简单,而 5 天后余震区复杂的应力调整过程激发稍强余震及次级余震。目前,云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列仍在持续发展,目前呈现的 p 值较低、 α 值有变化的早期特征尚需进一步跟踪考察。

研究中使用的地震目录由中国地震台网中心“全国地震编目系统”提供,日本统计数理研究所庄建仓教授提供了在访问地球物理研究所期间编制的 ETAS 模型程序,并予以了指导。本项工作属中国地震局“云南鲁甸 6.5 级地震专题研究”项目工作,两位审者提出的建设性意见对本文帮助很大。在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- 蒋长胜,韩立波,郭路杰. 2014. 新疆于田地区 2008 年以来 3 个地震序列的参数早期特征[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,吴忠良. 2011. 玉树 $M_s7.1$ 地震前的中长期加速矩释放

- (AMR) [J]. 地球物理学报, 54(6): 1501–1510.
- 蒋长胜, 庄建仓, 龙锋, 等. 2013b. 2013年芦山 $M_s 7.0$ 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, 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.
- Daley D. J., Vere-Jones D. . 2003. An Introduction to the Theory of Point Processes-Volume 1: Elementary Theory and Methods [M]. New York: Springer.
- 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 Tottori Prefecture Earthquake [J]. J. Geophys. Res. , 111(B4): B04301, doi: 10.1029/2005JB003982.
- Iwata T. . 2008. Low Detection Capability of Global Earthquakes after the Occurrence of Large Earthquakes; Investigation of the Harvard CMT catalogue [J]. Geophys J. Int. , 174(3): 849–856.
- Kagan Y. Y., Bird P., Jackson D. D. . 2010. Earthquake Patterns in Diverse Tectonic Zones of the Globe [J]. Pure Appl. Geophys, 167(6/7): 721–741.
- Ogata Y. . 1988. Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes [J]. J. Amer. Statist. Assoc. , 83(401): 9–27.
- Ogata Y. . 1989. Statistical Model for Standard Seismicity and Detection of Anomalies by Residual Analysis [J]. Tectonophysics, 169(1/3): 159–174.
- Ogata Y. . 1992. Detection of Precursory Relative Quiescence before Great Earthquakes through a Statistical Model [J]. J. Geophys. Res. , 97(B13): 19845–19871.
- Omori F. . 1894. On the After-shocks of Earthquakes [J]. J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, 7: 11–200.
- Schoenberg F. P., Chu A., Veen A. . 2010. On the Relationship between Lower Magnitude Thresholds and Bias in ETAS Parameter Estimates [J]. J. Geophys. Res. , 115: B04309, doi: 10.1029/2009JB006387.
- Sornette D., Werner M. J. . 2005. Apparent Clustering and Apparent Background Earthquakes Biased by Undetected Seismicity [J]. J. Geophys. Res. , 110(B9): B09303, doi: 10.1029/2005JB003621.
- 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): L21307, doi: 10.1029/2010GL044858.
- Zhuang J., Harte D., Werner M. J., et al. . 2012. Basic Models of Seismicity; Temporal Models [M/OL]. (2012–08–04) [2014–08–29]. http://www.corssa.org/silva_ethz/ETH/erdw/corssa/corssa/articles/themev/zhuang_et_al_a/zhuang_et_al_a.pdf.

Parameter Characteristic in the Early Stage of Yunnan Ludian $M_s 6.5$ Earthquake Sequence in 2014

GUO Lu-jie, JIANG Chang-sheng, HAN Li-bo
(Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract

Based on the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model, considering the influence of different cutoff magnitude and duration time, we investigated the parameter characteristics in the early stage of Yunnan Ludian $M_s 6.5$ earthquake sequence in 2014. It is observed that the p and α values kept stable and reliable when the cutoff magnitude $M_c = M_L 2.0$ was selected. The result of $p = 0.89 \sim 1.10$ indicated that it had a slow decay rate of aftershocks. The α -value showed a sharp drop on the 5th day after the main shock, which indicated the ability of provoking aftershocks change greatly.

Key words: earthquake sequence; ETAS model; cutoff magnitude; Yunnan Ludian $M_s 6.5$ earthquake