

徐世达,段俊康,何本国,等.基于指数函数的川滇地区余震序列衰减规律研究[J].地震工程学报,2024,46(1):207-213.DOI:10.20000/j.1000-0844.20211115002

XU Shida, DUAN Junkang, HE Benguo, et al. Decay law of aftershock sequences in the Sichuan—Yunnan region based on an exponential function[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1): 207-213. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211115002

基于指数函数的川滇地区余震序列衰减规律研究

徐世达, 段俊康, 何本国, 刘佳奇, 鲍泽铭, 陈天晓

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 较大的余震可能造成额外损失并有二次触发建筑物受灾的风险。为研究余震序列衰减规律,文章尝试采用指数衰减模型拟合分析 5 个不同地区余震序列,并借助修正赤池信息准则、贝叶斯信息准则与调整后 R^2 ,分析其与传统余震衰减模型的性能。结果表明,指数模型描述余震序列衰减规律的能力与修正的大森余震模型、修正的拉伸指数模型接近。尤其对于四川长宁 $M_s6.0$ 余震序列和云南彝良 $M_s5.7$ 余震序列,指数模型表现优于其他两种模型。指数模型参数具有明确的物理意义:参数 A 与 r 之和能够准确代表强震后的实际初始余震数,5 个余震序列初始余震数偏差均小于 1.70%;参数 k 可作为反映余震序列衰减快慢的特征值, k 值越大则余震序列衰减越慢,其值与主震震级呈反比例关系。

关键词: 余震序列; 指数函数; 初始余震数; 衰减

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)01-0207-07

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20211115002

Decay law of aftershock sequences in the Sichuan—Yunnan region based on an exponential function

XU Shida, DUAN Junkang, HE Benguo, LIU Jiaqi, BAO Zeming, CHEN Tianxiao

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines,
Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Large aftershocks can cause additional losses and trigger the risk of building damage. To study the decay law of aftershock sequences, this paper attempts to use the exponential decay model to fit and analyze five aftershock sequences in various regions. The performances of the exponential and traditional aftershock decay models were analyzed using the corrected Akaike information criterion, Bayesian information criterion, and adjusted R^2 . The results show that the ability of the exponential model to describe the decay law of aftershock sequences is close to that of the modified Omori aftershock model and the stretched exponential model, especially the $M_s6.0$ aftershock sequence in Changning, Sichuan Province, and the $M_s5.7$ aftershock sequence in the

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(62276058, 51974059); 大创项目(220044); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(N2217003, N2001001)

第一作者简介: 徐世达(1987—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩石力学、矿山微震、地震余震序列的教学与研究工作。

E-mail: xushida@mail.neu.edu.cn.

Yiliang county of the Yunnan Province. In these two sequences, the exponential model performed better than the other two models, and the exponential model parameters showed clear physical meanings. The sum of parameters A and r can accurately represent the number of initial aftershocks after a strong earthquake. The deviations in the initial aftershock number of the five aftershock sequences are all less than 1.70%. The parameter k can be used as a characteristic value that reflects the decay rates of the aftershock sequences. The larger the value of k , the slower the decay of the aftershock sequence; and its values are inversely proportional to the magnitude of the main shock.

Keywords: aftershock sequence; exponential function; number of initial aftershocks; decay

0 引言

余震是强地震发生后,围绕强震震源一定范围内发生的地震。强地震即为通常所说的主震,一次强地震发生后总是伴随着大量余震的发生,余震序列持续时间通常为几个月甚至数年。尤其是处于欧亚板块和印度板块交界处的川滇地区,地震活动频度高、强度大、余震持续时间长,是中国大陆最显著的地震活动区域。2008年5月12日汶川地震发生后,通过固定与流动台站相结合的方式获取余震记录,截至2008年9月12日,共记录到余震949次^[1]。余震发生可能会造成建筑物的进一步破坏,诱发二次灾害,严重威胁灾区居民的生命、财产安全。余震序列活动规律是震后趋势判定的重要内容,是震后公众关注的焦点问题。因此,针对地震活动频繁的川滇地区地震开展余震序列衰减规律研究,有助于强余震预测预报,对于缓解震后群众恐慌心理与灾后救援及重建工作具有重要意义。

针对余震序列衰减规律,国内外学者开展了大量研究并取得了丰硕成果。1894年,Omori^[2]研究了日本中部地震、Nobi地区地震以及日本其他地区的多个地震后,得到了余震发生率与地震后的时间成反比的结论,提出了著名的Omori余震衰减模型。随后Utsu^[3]发现累计余震数与 $\lg t$ 的曲线斜率随时间增大而逐渐减小,因此余震的衰减速度比Omori余震衰减模型预测的更快。针对这一现象,Utsu^[4]引入了表征余震衰减速度快慢的参数 p ,提出了修正Omori余震衰减模型(Modified Omori Model, MOM),有效增强了Omori余震衰减模型对余震衰减规律的拟合能力。Liu等^[5]通过监测矿山生产过程中声发射及微震现象,发现矿山生产过程中产生的微震及声发射事件的衰减规律同样符合MOM模型。Kisslinger^[6]提出了余震衰减拉伸指数模型。Gross等^[7]提出了修正拉伸指数模型(Modified Stretched Exponential mod-

el, MSE),并根据是否考虑背景率对比分析了14个余震序列的MOM模型与MSE模型的表现,其中5个余震序列MSE模型的表现最优。Lolli等^[8]基于MSE、MOM模型研究了意大利和南加州47个余震序列的衰减规律,基于赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)、贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)对不同模型对比分析,发现MSE模型表现不佳,无法替代MOM模型。Mignan^[9]采用幂函数模型、拉伸指数模型等多种模型对南加州、北加州以及中国台湾的多个余震序列进行拟合,得到拉伸指数模型比幂函数模型更适合分析余震序列衰减规律的结论。Barbara等^[10]对意大利拉奎拉地震序列的研究中发现了负指数模型的表现优于MOM模型的现象。综上所述,目前对余震衰减模型未形成统一的认识,且部分参数的物理意义存在争议。

据此,本文尝试采用指数函数(Exponential Decay model, ED)描述余震序列衰减规律,讨论指数函数中各参数物理意义及其数值分布特征。在此基础上,借助调整后 R^2 、修正赤池信息准则(corrected Akaike Information Criterion, AIC)与BIC评价指标,对比分析指数模型与传统余震衰减模型在描述川滇地区余震序列的表现,进一步验证采用指数模型描述余震序列衰减规律的可靠性。

1 模型介绍与数据获取

1.1 模型介绍

绝大多数余震序列具有余震数多、持续时间较长的特点^[11]。主震发生后,随着时间的推移,余震事件数越来越少,余震衰减速率也越来越慢。针对这种现象,本文尝试采用一种指数余震衰减模型拟合余震衰减规律,见式(1)^[12]:

$$N(t) = Ae^{-t/k} + r \quad (1)$$

式中: $N(t)$ 表示 t 时刻的余震事件数;参数 A 、 k 和 r 取值与余震序列衰减关系紧密相关,当时间为 0 时, $N(0)$ 等于 $A+r$,代表初始余震数。

由式(1)可知,当 $t=k$ 时,与初始余震数相比,单位时间余震数减少了 $A \times (e-1)/e$,可见 $t=k$ 可以作为余震衰减过程中的特征点。因此,参数 k 可以作为整个余震衰减过程中的特征时间,反映余震衰减的快慢。

MOM 模型见式(2)^[4]:

$$N(t) = K / (t + c)^p \quad (2)$$

式中: $N(t)$ 表示 t 时刻的余震发生数;参数 K 取决于主震后余震总数; t 是主震后经历的时间; c 是时间偏移量,用于消除地震初期余震发生率的奇异性。参数 p 的引入可以表征余震衰减速度的快慢。

MSE 模型见式(3)^[7]:

$$N(t) = (1-r)N^*(0) \cdot$$

$$\exp\left[\left(\frac{d}{t_0}\right)^{1-r}\right] \frac{(t+d)^{-r}}{t_0^{1-r}} \exp\left[-\left(\frac{t+d}{t_0}\right)^{1-r}\right] \quad (3)$$

式中: $N^*(0)$ 是主地震发生后的潜在余震总次数,作用与 MOM 模型中的 K 类似; $0 < r \leq 1$, $1-r$ 表示幂指数; t_0 是过程弛豫时间,类似于 MOM 模型中的参数 c ;参数 d 可通过余震序列规律拟合获得。MSE 模型在选取的时间窗口较长时相比于 MOM 模型拟合效果更好。

1.2 余震序列获取

余震序列完整程度受地震台站密度的影响。由

于地震频次较高,川滇地区观测台网建设密度大,观测余震经验更丰富,因此余震记录也更完备。考虑到余震序列的完整性与开放性,本文选取了川滇地区的 5 个余震序列。2017 年 8 月 8 日,四川省阿坝州九寨沟县发生 $M_s 7.0$ 地震,短短五天造成 25 人死亡、525 人受伤^[13-14];2013 年 4 月 20 日四川省雅安市芦山县发生 $M_s 7.0$ 地震^[15];2014 年 8 月 3 日,云南省昭通市鲁甸县发生 $M_s 6.5$ 地震^[16-17];2019 年 6 月 17 日,四川省宜宾市长宁县发生 $M_s 6.0$ 地震^[18-19];2012 年 9 月 7 日,云南彝良发生 $M_s 5.7$ 地震^[20]。这 5 次地震主震发生后,均发生了一定数量的余震。本文余震序列数据下载于中国地震台网。5 个序列的主震震级在 5.7~7.0 之间,采用序列 1~序列 5 依次将 5 个余震序列进行编号。依据相关文献,较多研究中余震序列持续时间选为 300~400 天,这是由于余震活动在主震发生后的 1~2 个月快速衰减,中后期余震事件率变化较小^[6,8]。本文所采用 5 次余震序列在主震发生两个月后,余震事件率比初始余震数下降了 94% 以上。因此,余震序列持续时间选取为一年,以该时间范围内最后一个余震事件时间为结束时间。余震序列通常需满足巴斯定律^[21]:

$$\Delta M = M_{ms} - M_{as}^{max} \approx 1.2 \quad (4)$$

式中: M_{ms} 为主震震级; M_{as}^{max} 为最大余震震级; ΔM 为主震震级与最大余震震级的差值,根据巴斯定律,此差值约等于 1.2。本文分析的所有余震序列近似符合这一定律。余震序列的持续时间、区域范围及震级等信息列于表 1。

表 1 余震序列详细信息

Table 1 Details of the aftershock sequences

编号	序列	起始时间	结束时间	最大经度(E)	最小经度(E)	最大纬度(N)	最小纬度(N)	最大震级	最小震级
序列 1	九寨沟 $M_s 7.0$	2017-08-08	2018-08-05	104.09°	103.68°	33.37°	32.85°	4.9	1.6
序列 2	芦山 $M_s 7.0$	2013-04-20	2014-04-05	103.2°	102.57°	30.46°	29.91°	5.4	2.6
序列 3	鲁甸 $M_s 6.5$	2014-08-03	2015-07-31	103.6°	103.22°	27.25°	27.01°	4.4	1.7
序列 4	长宁 $M_s 6.0$	2019-06-17	2020-06-16	105.6°	103.62°	29.04°	27.44°	4.6	1.3
序列 5	彝良 $M_s 5.7$	2012-09-07	2013-07-25	104.05°	103.95°	27.59°	27.49°	4.4	2.1

2 余震衰减规律研究

2.1 余震衰减曲线拟合

时间间隔对余震序列规律有明显影响,考虑余震序列持续时间,余震序列采用 5 天时间间隔统计^[10]。图 1 是 5 个余震序列 MOM、MSE 和 ED 模型拟合分析结果。序列 1 主震发生后,余震事件数在第 1 个统计周期内迅速增大至 236 个;即初始余震数为 236;随着时间的推移,余震事件率快速衰减,主震发生 60 天时,单个统计周期内余震事件数

降低至 5 个以下,并且长期稳定在较低的水平。序列 2 在主震发生后的 5 天内余震事件数达到了 181 个,25 天后余震事件数降低到 5 个以下。序列 3 在主震发生后的 5 天内余震事件数达到 103 个,随后余震活动衰减相对较慢,单个统计周期内的余震事件数降低到 5 个,耗时 190 天。序列 4 初始余震数高达 325 个,随后余震活动性快速衰减;至主震发生后 75 天,余震活动衰减至较低水平;但主震发生 80 天后,余震事件率维持在 10~20 个/5 天,余震活动相对较活跃。序列 5 的初始余震数 27 个,之后迅速

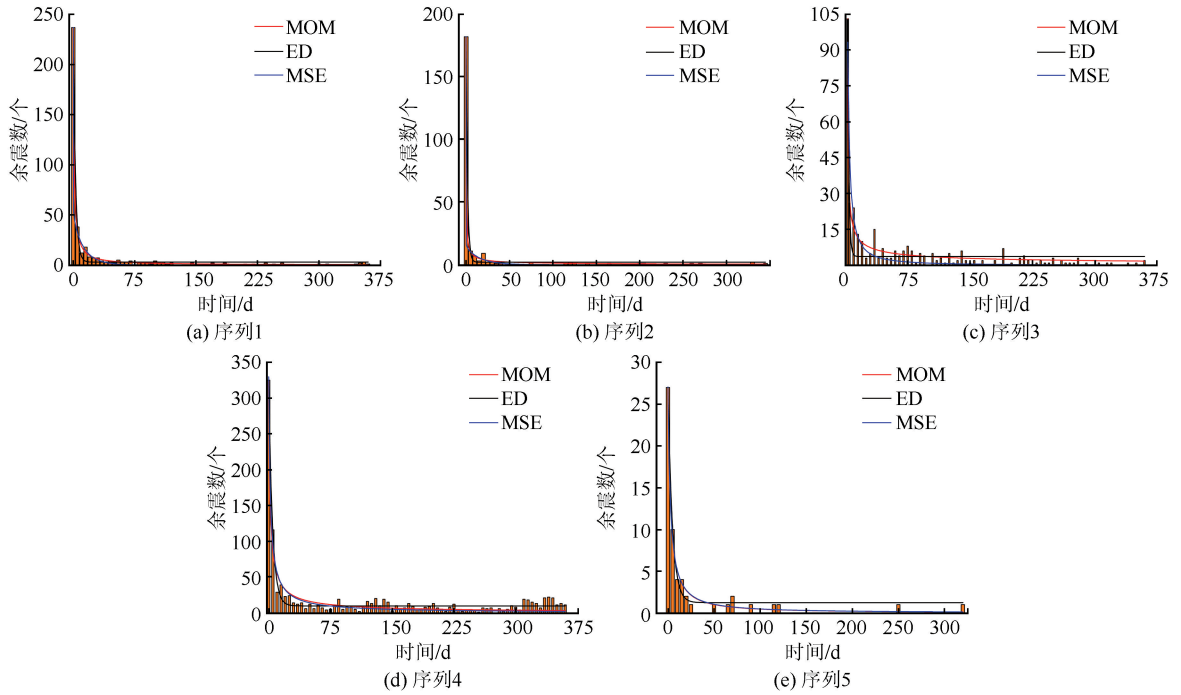


图 1 不同模型的余震衰减曲线

Fig.1 Decay curves of earthquake aftershocks with different models

衰减,最终稳定在较低的水平。从图 1 中发现 MOM、MSE 和 ED 模型曲线均能较好地描述 5 个余震序列衰减规律。

2.2 模型参数特征分析

图 2 是 5 个余震序列 ED 模型参数 $A+r$ 的值与实际初始余震数的关系。序列 1 地震序列初始余震数为 237 个, A 值为 233.85, r 值为 2.95, ED 计算初始余震数为 236.79, 偏差 0.01%。序列 2 地震序列初始余震数为 182 个, A 值为 179.99, r 值为 2.00, ED 计算初始余震数为 181.99, 与实际初始余震数偏差较小。序列 3 地震序列初始余震数为 103

个, A 值为 97.90, r 值 3.35, ED 计算初始余震数为 101.25, 偏差 1.70%。序列 4 地震序列初始余震数为 325 个, A 值为 315.04, r 值为 9.75, ED 计算初始余震数为 324.79, 偏差 0.06%。序列 5 地震序列初始余震数为 27 个, A 值为 25.67, r 值为 1.24, ED 计算初始余震数为 26.90, 偏差 0.04%。5 个余震序列 A 与 r 之和与初始余震数偏差较小, 因此, 5 个余震序列采用 ED 模型拟合时, 参数 A 与 r 的和能够准确描述余震序列初始余震数。

图 3 是 5 个余震序列采用 ED 模型拟合得到的 k 值。余震序列 k 值的特点类似于原子核的半衰期, 可以反映余震序列衰减的快慢。九寨沟 $M_s7.0$ 、

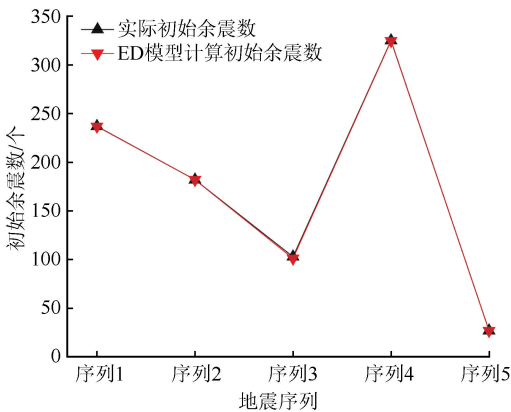


图 2 实际初始余震数与 ED 模型计算初始余震数

Fig.2 Actual number and the number of initial aftershocks calculated by ED model

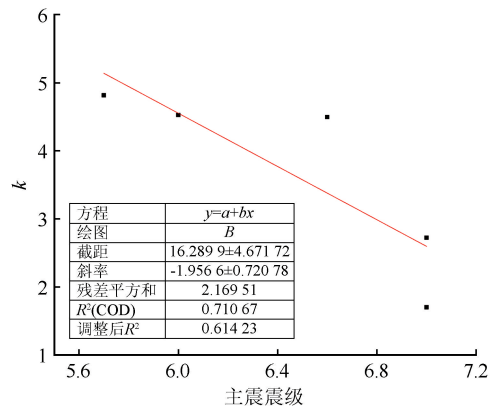


图 3 主震震级与 k 值关系

Fig.3 Relation between magnitude of main shock and k value

四川芦山 $M_s7.0$ 、云南鲁甸 $M_s6.5$ 、四川长宁 $M_s6.0$ 、云南彝良 $M_s5.7$ 地震序列的 k 值分别为 2.72、1.70、4.49、4.52、4.81。四川芦山 $M_s7.0$ 地震序列 k 值最小,云南彝良 $M_s5.7$ 地震序列 k 值最大,说明前者衰减最快,后者衰减最慢,这与图 1 所示规律一致。因此,ED 模型 k 值可用于描述余震序列衰减的快慢。

模型参数 A 和 r 与主震震级无明显的相关性,但参数 k 与主震震级具有明显的负相关关系。云南彝良地震主震震级为 5.70 级, k 值为 4.81。四川九寨沟与庐山地震主震震级为 7.0 级,这两个地震余震序列的 k 值分别为 2.72 和 1.70。显然,随着主震震级的增大,参数 k 呈减小的趋势。

综上所述,通过拟合结果可以明显发现 MOM 模型、MSE 模型以及 ED 模型均能对余震衰减规律进行较好的描述。ED 模型的参数 A 与 r 之和可以准确描述余震序列的初始余震数,误差均小于 1.7%;模型参数 k 能够反映余震衰减速度的快慢,其值与余震序列的主震震级呈负相关。

3 余震衰减模型分析

3.1 评价方法

通过对余震衰减模型的拟合优度进行计算,可以表征不同余震衰减模型对于余震序列的适用性。考虑余震序列样本数量与余震衰减模型参数个数,本文采用调整后 R^2 、修正的赤池信息准则^[22]和贝

叶斯信息准则^[23]对模型的拟合能力进行评价。调整后 R^2 、 AIC_c 和 BIC 分别见式(5)~(7)。

$$\text{调整后 } R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{(n - 1)}{n - k - 1} \tag{5}$$

$$AIC_c = n \times \ln\left(\frac{SSR}{n}\right) + 2 \times (k + 1) - n \times \ln(n) - \frac{k \times (k + 1)}{n - k - 1} \tag{6}$$

$$BIC = n \times \ln(SSR/n) + (k + 1) \times \ln(n) - n \times \ln(n) \tag{7}$$

式中: R 表示相关性系数; k 表示模型参数的数量; n 表示样本数量; SSR 表示残差平方和。通过 AIC_c 和 BIC 评价模型表现时, AIC_c 和 BIC 值越小说明模型拟合数据能力越高。

3.2 余震衰减模型分析

图 4 分别是 5 个余震序列采用不同余震衰减模型拟合分析获得的 AIC_c 与 BIC 值。序列 1~序列 3 MOM 模型的 AIC_c 和 BIC 最小,序列 4 与序列 5 的 ED 模型的 AIC_c 和 BIC 最小。这说明,九寨沟 $M_s7.0$ 、四川芦山 $M_s7.0$ 和云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列 MOM 模型表现好,四川长宁 $M_s6.0$ 、云南彝良 $M_s5.7$ 地震序列 ED 模型表现好。MSE 模型表现与 MOM 模型较为接近,但均弱于 MOM 模型。值得注意的是,ED 模型在 5 个余震序列衰减规律拟合中表现较稳定, MOM 模型与 MSE 模型波动相对较大。

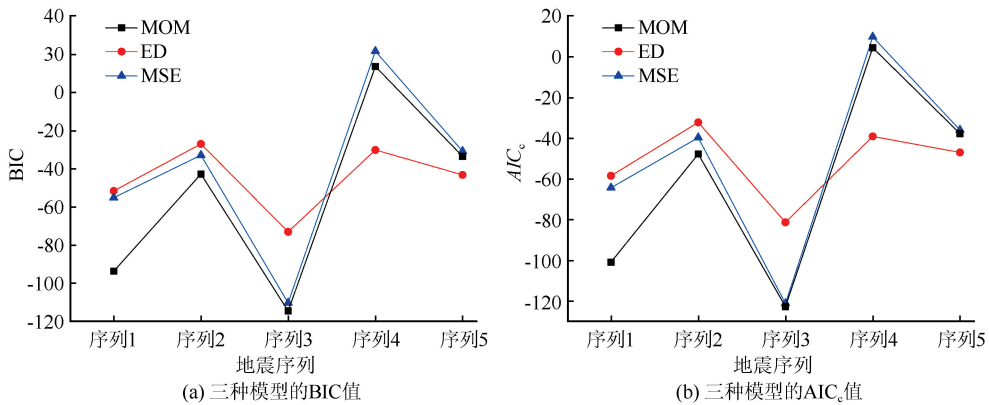


图 4 不同模型的 BIC 以及 AIC_c 值

Fig.4 BIC and AIC_c values of different models

图 5 是 5 个余震序列通过不同模型拟合得到的调整后 R^2 。序列 1、序列 2 三种模型调整后 R^2 的数值较接近,序列 3 MOM 模型和 MSE 模型的调整后 R^2 高于 ED 模型,序列 4~序列 5 ED 模型调整后 R^2 高于 MOM 模型以及 MSE 模型。这说明采用调整后 R^2 评价时,三种模型在九寨沟 $M_s7.0$ 地

震序列、四川芦山 $M_s7.0$ 地震序列的拟合分析中差距并不明显,云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列拟合分析中 MOM 模型以及 MSE 模型表现较好,而 ED 模型在四川长宁 $M_s6.0$ 地震、云南彝良 $M_s5.7$ 地震序列拟合分析中表现明显高于另外两种模型。

AIC_c 、BIC 和调整后 R^2 评价三种模型在 5 个

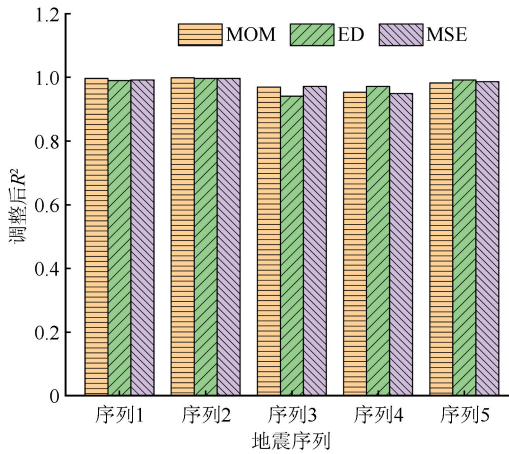


图5 不同模型在各序列中调整后 R^2

Fig.5 Adjusted R^2 of different models in each sequence

余震序列衰减规律拟合分析中表现结果基本一致。MOM模型和MSE模型在地震序列1、序列2中表现相对较好,序列2的MOM模型以及MSE模型对比于ED模型优势较大,ED模型在序列4、序列5表现最优。在描述九寨沟 $M_S7.0$ 地震、四川芦山 $M_S7.0$ 地震、云南鲁甸 $M_S6.5$ 地震、四川长宁 $M_S6.0$ 地震、云南彝良 $M_S5.7$ 地震余震衰减规律时,ED模型表现可与传统的余震衰减模型相媲美。因此,ED模型能够较准确地描述强震后余震衰减规律。由图4可知,ED模型在描述不同余震序列衰减规律时相对更稳健, AIC_c 和 BIC 波动相对较小。MSE模型采用分段函数,在研究余震序列时,若选取较长的时间窗口,MSE模型的优势较MOM、ED模型更明显。MOM和MSE模型描述不同余震序列时表现相对不稳定,更适合分析中后期相对不发育的余震序列,尤其是MSE模型,描述后期规律差异较大的余震序列更具优势。

4 结论

本文采用ED、MOM与MSE模型对九寨沟 $M_S7.0$ 地震、四川芦山 $M_S7.0$ 地震、云南鲁甸 $M_S6.5$ 地震、四川长宁 $M_S6.0$ 地震、云南彝良 $M_S5.7$ 地震余震序列衰减规律进行了拟合分析,并通过 AIC_c 、 BIC 和调整后 R^2 对模型表现进行了评价。

(1) ED模型能较准确地描述五个余震序列衰减规律,其表现比传统的MOM、MSE余震衰减模型稳定,更适用于中后期余震相对发育的序列。在长宁 $M_S6.0$ 地震和彝良 $M_S5.7$ 地震余震序列衰减规律拟合分析中相比于传统模型表现更优。

(2) 参数 A 与 r 的和代表强震后初始余震数。5个余震序列中, A 与 r 的和能够较准确描述实际初始余震数,偏差均小于1.70%。

(3) 参数 k 可作为余震衰减特征时间,能够反映余震序列衰减的快慢。在本文5个余震序列中,其值与主震震级呈反比。

参考文献(References)

- [1] 韩建平,徐金玉.汶川地震强余震统计特性及地震动衰减关系[J].世界地震工程,2019,35(1):9-16.
HAN Jianping, XU Jinyu. Statistical characteristics of strong aftershocks of Wenchuan earthquake and ground motion attenuation relationship[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35 (1): 9-16.
- [2] OMORI F. On the aftershocks of earthquakes[J]. Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, 1894, 7: 111-120.
- [3] UTSU T. Magnitude of earthquakes and occurrence of their aftershocks[J]. Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan 2nd Ser), 1957, 10(1): 35-45.
- [4] UTSU T. A statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. Geophys Mag, 1961, 30(4): 521-605.
- [5] LIU J P, XU S D, LI Y H. Analysis of rock mass stability according to power-law attenuation characteristics of acoustic emission and microseismic activities[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 303-312.
- [6] CARL K. The stretched exponential function as an alternative model for aftershock decay rate[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 1993, 98(B2): 1913-1921.
- [7] GROSS S J, KISSLINGER C. Tests of models of aftershock rate decay[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(5): 1571-1579.
- [8] LOLLI B, GASPERINI P. Comparing different models of aftershock rate decay: the role of catalog incompleteness in the first times after main shock[J]. Tectonophysics, 2006, 423(1-4): 43-59.
- [9] MIGNAN A. Modeling aftershocks as a stretched exponential relaxation[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(22): 9726-9732.
- [10] LOLLI B, GASPERINI P, BOSCHI E. Time variations of aftershock decay parameters of the 2009 April 6 L'Aquila (central Italy) earthquake: evidence of the emergence of a negative exponential regime superimposed to the power law[J]. Geophysical Journal International, 2011, 185(2): 764-774.
- [11] 翟亮. 精河地震余震序列精定位、震源机制及发震构造分析[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2019.
ZHAI Liang. Precise location, focal mechanism and seismogenic structure analysis of Jinghe earthquake aftershock sequence[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA, 2019.
- [12] XU S D, CHEN T X, LIU J Q, et al. Exponential decay law of

- acoustic emission and microseismic activities caused by disturbances associated with multilevel loading and mining blast [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3549-3563.
- [13] 梁昌健. 四川九寨沟 $M_S7.0$ 级地震的发震构造及成因机制分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- LIANG Changjian. Analysis of seismogenic structure and genetic mechanism of Jiuzhaigou earthquake with $M_S7.0$ in Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [14] 梁姗姗, 雷建设, 徐志国, 等. 2017 年四川九寨沟 $M_S7.0$ 强震的余震重定位及主震震源机制反演[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 2163-2175.
- LIANG Shanshan, LEI Jianshe, XU Zhiguo, et al. Relocation of aftershocks of the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan, $M_S7.0$ earthquake and inversion for focal mechanism of the mainshock [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 2163-2175.
- [15] 徐培彬, 温瑞智, 王宏伟, 等. 2013 年 4 月 20 日芦山地震滑坡危险性评估[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增刊 1): 983-987.
- XU Peibin, WEN Ruizhi, WANG Hongwei, et al. Landslide risk assessment of Lushan earthquake on April 20, 2013[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Suppl01): 983-987.
- [16] 何骁慧, 倪四道, 刘杰. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M6.5$ 地震破裂方向性研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(3): 253-263.
- HE Xiaohu, NI Sidao, LIU Jie. Rupture directivity of the August 3rd, 2014 Ludian earthquake (Yunan, China)[J]. Scientia Sinica Terrae, 2015, 45(3): 253-263.
- [17] 邵崇建, 李勇, 周游, 等. 2014 年云南鲁甸 $M_S6.5$ 地震发震构造特征及动力源分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1082-1089.
- SHAO Chongjian, LI Yong, ZHOU You, et al. Analysis of the dynamic source and characteristics of the seismogenic structure of the Ludian, Yunnan $M_S6.5$ earthquake of 2014[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1082-1089.
- [18] 尹欣欣, 郭安宁, 赵韬, 等. 四川长宁 $M_S6.0$ 地震区域构造应力场特征分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1215-1220.
- YIN Xinxin, GUO Anning, ZHAO Tao, et al. Characteristics of the regional tectonic stress field of the Changning $M_S6.0$ earthquake, Sichuan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1215-1220.
- [19] 明伟庭, 王运生, 赵波, 等. 长宁 $M_S4.6$ 级地震斜坡地震动响应监测研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5): 159-168.
- MING Weiting, WANG Yunsheng, ZHAO Bo, et al. Monitoring result analysis of seismic response to Changning $M_S4.6$ earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(5): 159-168.
- [20] 刘希康, 李媛, 丁志峰, 等. 2012 年 9 月 7 日彝良地震震源区横波分裂变化特征分析[J]. 地震, 2020, 40(1): 73-83.
- LIU Xikang, LI Yuan, DING Zhifeng, et al. A study on variation characteristics of shear-wave splitting in the September 7, 2012 Yiliang earthquake region[J]. Earthquake, 2020, 40(1): 73-83.
- [21] BATH M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle[J]. Tectonophysics, 1965, 2(6): 483-514.
- [22] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [23] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model[J]. The Annals of Statistics, 1978, 6(2): 31-38.

(本文编辑: 贾源源)