

尚园程, 史保平. 2020. 基于经验模型分析 2018 年 2 月台湾花莲地震序列特征及其前震的成因机制. 地震学报, 42(1): 1-11. doi: 10.11939/jass.20190058.

Shang Y C, Shi B P. 2020. Statistical analysis of the February 2018 Hualien, Taiwan, China, earthquake sequence: The features of its foreshocks, mainshocks, and aftershocks. *Acta Seismologica Sinica*, 42(1): 1-11. doi: 10.11939/jass.20190058.

# 基于经验模型分析 2018 年 2 月台湾花莲地震序列特征及其前震的成因机制<sup>\*</sup>

尚园程<sup>†</sup> 史保平

(中国北京 100049 中国科学院大学地球与行星科学学院)

**摘要** 利用地震学的三个经典经验模型(古登堡-里克特定律、修正的大森定律和巴特定律)和描述前震活动的 Dieterich 前震模型对 2018 年 2 月中国台湾花莲地震序列的特征进行了分析. 将该地震序列分为  $M_{L5.5}$  前震序列、 $M_{L5.5}$  余震序列和  $M_{L6.0}$  余震序列等 3 段子序列进行研究, 结果显示: 利用古登堡-里克特定律得到的  $M_{L5.5}$  余震序列和  $M_{L6.0}$  余震序列的  $b$  值近似为 1,  $M_{L5.5}$  前震序列的  $b$  值近似为 0.5; 利用修正的大森定律得到的  $M_{L5.5}$  余震序列和  $M_{L6.0}$  余震序列的  $p$  值近似为 0.9; 利用修正的巴特定律得出  $M_{L5.5}$  余震序列和  $M_{L6.0}$  余震序列的推定最大余震震级分别为  $M_{L5.0}$  和  $M_{L5.5}$ , 与实际数据相比, 其误差值约为 0.1. 通过拟合  $M_{L5.5}$  前震的发生率, 分析可得  $M_{L5.5}$  前震序列的地震发生率  $\dot{N}$  正比于  $1/(t_m - t)$ , 其中  $t$  ( $t < t_m$ ) 为前震发生时刻,  $t_m$  为  $M_{L5.5}$  地震发生时间, 与 Dieterich 前震模型对前震现象的描述一致, 表明其成因机制可能为主震成核过程中区域断层的次级断裂.

**关键词** 花莲地震  $b$  值  $p$  值 巴特定律 Dieterich 模型

doi: 10.11939/jass.20190058 中图分类号: P315.08 文献标识码: A

## Statistical analysis of the February 2018 Hualien, Taiwan, China, earthquake sequence: The features of its foreshocks, mainshocks, and aftershocks

Shang Yuancheng<sup>†</sup> Shi Baoping

(College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As we know, the statistical properties of an earthquake sequence are associated with three important empirical laws in seismology: Gutenberg-Richter law for the frequency-magnitude distribution, Båth law for the magnitude of the largest aftershock, and the modified Omori's law for the temporal decay of aftershocks. In this paper these three laws are combined to study the February 2018 Hualien, Taiwan, China, earthquake sequence. In addition, a physics-based model proposed by Dieterich is used to describe the foreshock activities. The

\* 基金项目 国家自然科学基金(41574040)和国家国际科技合作专项(2015DFA21260)共同资助.

收稿日期 2019-03-19 收到初稿, 2019-09-12 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: shangyuancheng17@mails.ucas.ac.cn



Hualien aftershock sequence is divided as three major sequences compounding with the  $M_L 5.5$  foreshock sequence, the  $M_L 5.5$  aftershock sequence and the  $M_L 6.0$  sequence. The results indicate that the  $b$  values associated with Gutenberg-Richter law for the  $M_L 5.5$  aftershock sequence and the  $M_L 6.0$  aftershock sequence are approximately 1, respectively. And  $b$  value of the  $M_L 5.5$  foreshock sequence are approximately 0.5. The  $p$  values with associated modified Omori's law for the  $M_L 5.5$  and  $M_L 6.0$  aftershock sequences are both approximately 0.9, respectively. The estimated maximum aftershock magnitudes based on the modified form of Båth law are about  $M_L 5.0$  and  $M_L 5.5$ , respectively, for  $M_L 5.5$  and  $M_L 6.0$  aftershock sequences, and the magnitude error is within  $\Delta M = 0.1$  with a comparison to the recorded events. We also find that, for the  $M_L 5.5$  foreshock sequence, the seismicity rate  $\dot{N}$  increases as a function of  $1/(t_m - t)$ , where  $t$  ( $t < t_m$ ) is the time of the foreshock and  $t_m$  is the time when the  $M_L 5.5$  earthquake occurred, respectively, which is consistent with the Dieterich earthquake triggering model, suggesting that the foreshock sequence may be related with mainshock nucleation process.

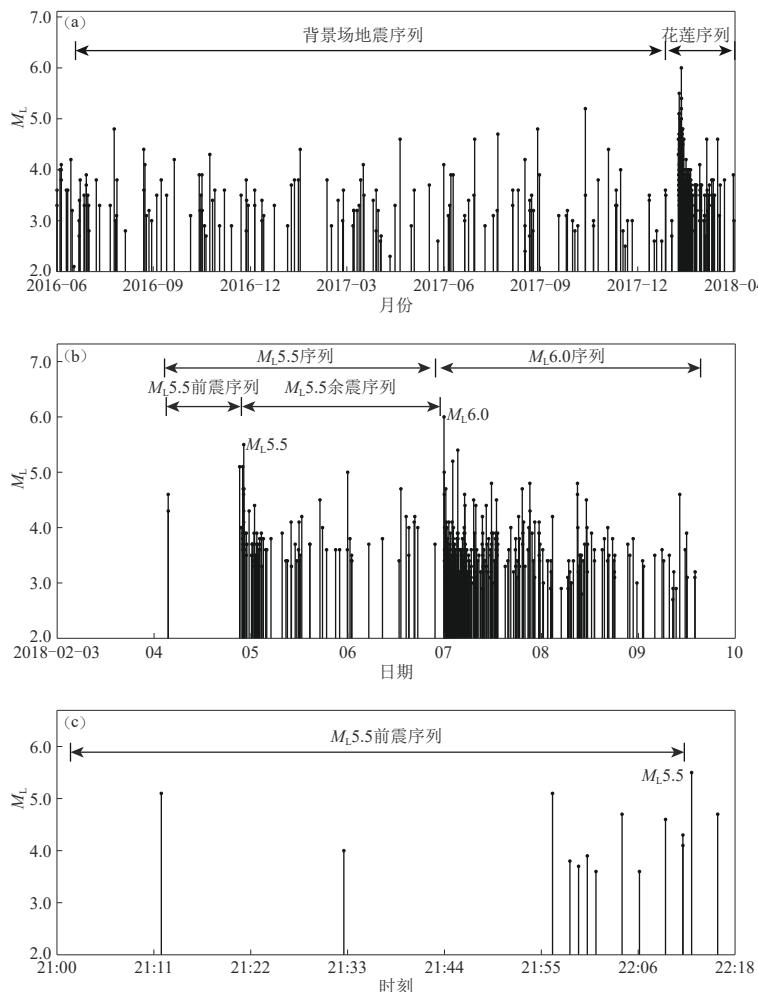
**Key words:** Hualien earthquake;  $b$ -value;  $p$ -value; Båth law; Dieterich model

## 引言

北京时间 2018 年 2 月 4 日 3 时 30 分至 4 月 1 日 0 时 0 分, 中国台湾花莲东部海域发生了一组中等大小的地震(简称为花莲序列), 其中最大震级为  $M_L 6.0$  ( $M_W 6.4$ )。此次破坏性地震共造成 17 人死亡, 295 人受伤, 4 幢建筑坍塌, 至少 175 幢受损。从震级-时间分布图(图 1a, b)中可以看出, 整个地震序列可以被分为两个明显的子序列, 其中: 第一个子序列为 2 月 4 日至 2 月 6 日 23 时 50 分  $M_L 6.0$  地震发生前(以下简称为  $M_L 5.5$  序列), 该序列中最大震级为  $M_L 5.5$ , 震中位置为(24.18°N, 121.73°E), 震源深度约为 10 km; 而第二个子序列地震发生率相对较高的时间为 2 月 6 日  $M_L 6.0$  地震发生后至 2 月 10 日(以下简称为  $M_L 6.0$  序列), 该序列中最大震级为  $M_L 6.0$ , 震中位置为(24.14°N, 121.69°E), 震源深度约为 10 km。据美国地质调查局相关报道, 此次花莲地震序列可能是由于菲律宾海板块与欧亚大陆板块之间的米伦(Milun)断层斜滑所致(USGS, 2018), 而最新的研究则认为此次地震是由米伦断层左旋走滑所致(Kuo *et al.*, 2018)。

台湾地处环太平洋地震带西部, 是多个板块的交会部位。受太平洋板块向西运动的影响, 菲律宾海板块以大约 75 mm/a 的速度向欧亚板块俯冲, 致使台湾地区地震活动极为频繁, 尤其是花莲地区。自 1901 年以来, 台湾共发生 102 次  $M_L \geq 5.0$  的灾害性中强地震, 破坏性最强的是 1999 年 9 月 21 日集集  $M_L 7.3$  地震, 该地震造成了 2 415 人死亡。在这些中强地震中共有 24 次地震发生在花莲地区, 其中  $M_L \geq 7.0$  地震 18 次,  $M_L \geq 8.0$  地震 5 次, 最大地震为 1920 年 6 月 5 日的  $M_L 8.3$  地震(台湾气象局, 2018)。

此次花莲地震序列(23.75°N—24.39°N, 121.38°E—122.1°E)共发生  $M_L \geq 3.0$  地震 449 次(台湾气象局, 2018), 其中  $M_L \geq 4.0$  地震 74 次,  $M_L \geq 5.0$  地震 8 次,  $M_L \geq 6.0$  地震 1 次。花莲地区的地震时空分布如图 1 和图 2 所示, 可以看出: 花莲地区所发生的背景地震序列(2016 年 6 月 1 日至 2018 年 2 月 3 日)大多分布在米伦断层及其北东向延伸的两侧(图 2)。 $M_L 5.5$  地震之前至少有 14 次  $M_L \geq 3.5$  的地震集中在  $M_L 5.5$  地震北方(以下简称  $M_L 5.5$  前震序列)。花莲  $M_L 6.0$  地震发生之前,  $M_L 5.5$  地震发生之后的序列(以下简称为  $M_L 5.5$  余震序列)发

图1 花莲地区  $M-t$  图

(a) 2016年6月1日至2018年3月30日; (b) 2018年2月3日至10日; (c) 2018年2月4日21时0分至22时18分

Fig. 1  $M-t$  diagram of Hualian area

(a) From June 1, 2016 to March 30, 2018; (b) From 3 to 10 February, 2018; (c) From 21: 00 to 22: 18 on February 4, 2018

生在背景地震分布范围之内, 主要集中在背景分布场的上方(图2), 其东北至西南走向展布约为15 km, 西北至东南向展布约为10 km. 2月6日所发生的 $M_L 6.0$ 地震及该段序列中早期发生的余震震中均分布于 $M_L 5.5$ 序列分布范围内, 但随着时间的推移, 该序列的多数余震沿米伦断层的走向向西南方向分布, 且多集中于背景地震分布区域的西南端, 其东北至西南走向展布约为40 km, 西北至东南向展布约为10 km. 此次花莲地震序列引发了众多学者的关注, 而前人的研究(Jian et al., 2018; Kuo et al., 2018; Lin et al., 2018; Ma, Wu, 2018; Chan et al., 2019)大多建立在此次花莲序列的震型为前震-主震-余震的基础上, 即认为 $M_L 5.5$ 序列仅为 $M_L 6.0$ 地震的前震, 而本文将上述研究中的前震 $M_L 5.5$ 序列进一步分成 $M_L 5.5$ 前震序列和 $M_L 5.5$ 余震序列(图1b)两个序列进行分析.

关于地震的成因机制以及断层之间的相互作用过程一直是学术界的研究重点, 但是由

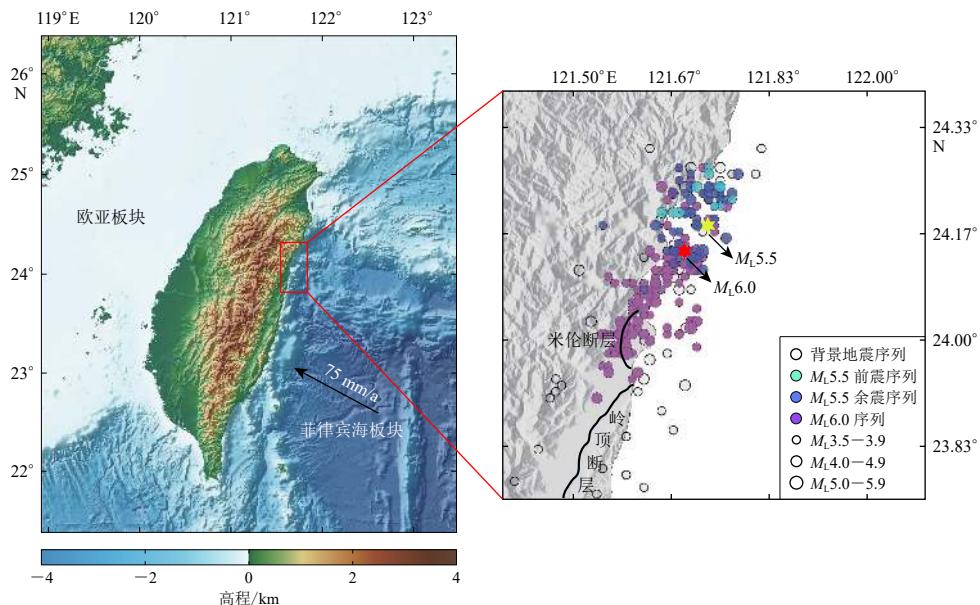


图 2 2016年6月1日至2018年2月10日花莲地区地震空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of Hualian earthquakes from June 1, 2016 to February 10, 2018

于缺乏来自发震断层内部详细和直接的物理描述,至今我们仍然无法准确地预测地震,尤其是中强地震的发生时间、地点和强度。因此,利用统计学方法研究地震的重复发生特征和现今地震活动性成为必然:一方面,可以为地震中长期预测提供一些切实可行的方法;另一方面,通过统计分析与地震活动相关的时空分布特征,可为地震成因机制的研究提供相应的物理模型。在对地震活动性的统计分析中,目前已被广泛认可的经验定律主要有三个:①描述震级与频度关系的古登堡-里克特(Gutenberg-Richter, 缩写为 G-R)定律;②描述余震衰减规律的修正的大森(Omori)定律;③评估主震后最大余震震级的巴特(Båth)定律。本文将利用上述三个经验模型与基于速率和状态摩擦(rate- and state-dependent friction, 简写为 RSF)定律所提出的 Dieterich 前震模型(Dieterich, Kilgore, 1996)对此次花莲地震序列进行分段研究。

## 1 经验定律分析

### 1.1 确定完备震级 $M_c$

由于目前测震仪器精度的限制及地震数据选取与地震事件识别方法的局限性,一些小震级地震事件无法被全部识别。因此,在使用台网数据作分析研究时应首先明确地震目录的完备震级  $M_c$ ,即在给定的时间段和空间范围内可以全部被记录识别的地震事件的最小震级。本文采用两种方法估算此次花莲地震目录的完备震级:第一种方法是最大曲率方法(Wiemer, Wyss, 2000),该方法在实际计算时将非累积频率-震级分布中取得最大值的震级档作为完备震级  $M_c$ ,利用这种方法计算得到花莲地震目录的完备震级  $M_c$  为 3.5;第二种方法是对比古登堡-里克特定律拟合得到的曲线与实际观测到的震级-频度分布图,并取两者相符部分的起始震级作为  $M_c$  的估值(图 3)(Zúñiga, Wyss, 1995),用此方法估算得到花莲地震目录的背景地震序列、 $M_{L5.5}$  前震序列、 $M_{L5.5}$  余震序列、 $M_{L6.0}$  序列的  $M_c$  值同样均为 3.5,因此本文采用的完备震级  $M_c=3.5$ 。

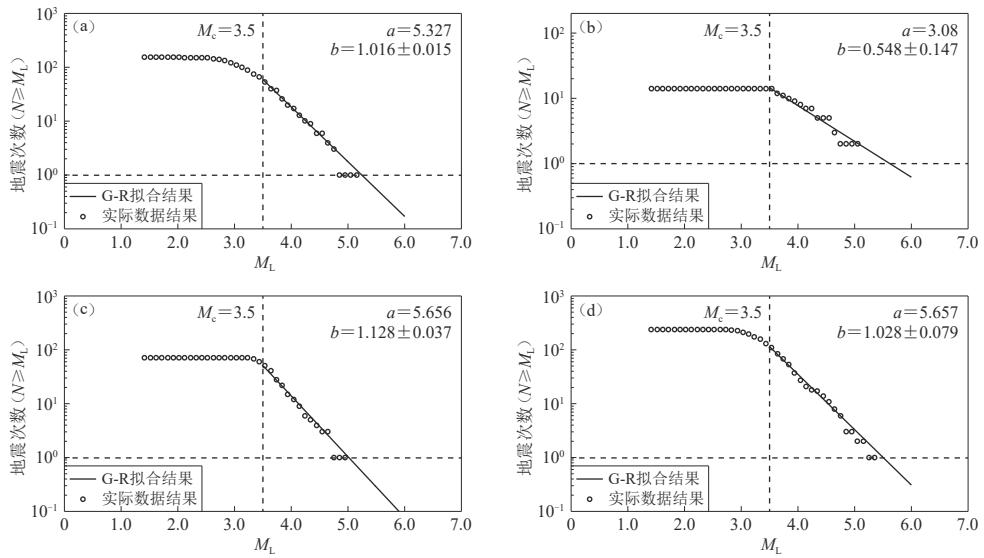


图3 花莲地震序列发生后不同地震序列的地震目录的震级-频度图

(a) 背景地震序列; (b)  $M_L 5.5$  前震序列; (c)  $M_L 5.5$  余震序列; (d)  $M_L 6.0$  序列

Fig. 3 The magnitude-frequency plot for the catalog of Hualian earthquakes with different time spans

(a) Background earthquake sequence; (b)  $M_L 5.5$  foreshock sequence;  
 (c)  $M_L 5.5$  aftershock sequence; (d)  $M_L 6.0$  earthquake sequence

## 1.2 古登堡-里克特定律(震级-频度关系)

无论是对于全球尺度还是区域尺度的地震, 地震震级和发生频度一般都满足古登堡-里克特定律(Marzocchi, Sandri, 2003; Shcherbakov, Turcotte, 2004), 其定量关系可表示为:

$$\lg N(\geq M) = a - bM, \quad (1)$$

式中,  $N(\geq M)$  表示震级大于等于  $M$  的地震总次数,  $a$  和  $b$  为正常数.  $a$  值描述了选定区域的地震活动性水平的高低程度, 而  $b$  值的大小与区域介质特性、应力状态和不均匀性有关, 能反映所研究区域地震的震源特性. 对于背景场地震序列、前震序列、余震序列而言, 古登堡-里克特定律依旧成立, 相对应的  $b$  值范围也与区域或全球的统计结果基本一致(Shcherbakov, Turcotte, 2004). 对于  $a$  值与  $b$  值的估算, 可以采用最小二乘法或者最大似然法, 但利用最小二乘法计算的  $b$  值存在系统性的偏差(Sandri, Marzocchi, 2007; Hamdache *et al.*, 2017). 所以本文选择 Marzocchi 和 Sandri (2003) 给出的最大似然法来估计  $b$  值及其不确定度  $\delta_b$ ,

$$b = \frac{1}{\ln 10 [\bar{M} - (M_c - dM/2)]}; \quad (2)$$

$$\delta_b = \frac{b}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

式中,  $\bar{M}$  为地震目录的平均震级,  $M_c$  为完备震级,  $dM$  为仪器测定的地震震级间隔,  $dM = 0.1$  (Marzocchi, Sandri, 2003),  $N$  为地震目录中地震事件的总数,  $a$  值则为

$$a = \lg N(\geq M_c) + bM_c. \quad (4)$$

在拟合古登堡-里克特定律时, 地震序列的主震不应出现在拟合曲线中, 进而将式(2),

(3) 和 (4) 应用到包括背景地震在内的花莲地震序列, 得到表 1 和图 3 的结果。结果表明: 花莲地区的背景地震序列、 $M_L 5.5$  余震序列、 $M_L 6.0$  序列的  $a$  值均接近于 5.5,  $b$  值均接近于 1; 而对于  $M_L 5.5$  前震序列,  $a$  值和  $b$  值均小于上述 3 个序列,  $b$  值相对于其它三个序列平均下降了 50%。前人研究认为前震序列中的  $b$  值明显小于余震序列中的  $b$  值 (Jones, 1985; Helmstetter *et al.*, 2003), 这说明出现在此次花莲序列中的  $M_L 5.5$  前震序列所表现出的震级-频度规律与前人的研究总结相一致, 但  $M_L 5.5$  余震序列的  $b$  值却未表现出这一关系。

表 1 通过古登堡-里克特定律拟合得到的不同时间尺度下的  $a$  值与  $b$  值

Table 1 Fitting  $a$ -value and  $b$ -value by the Gutenberg-Richter law with different time scales

地震序列	起始时间		持续时间/d	$a$ 值	$b$ 值
	年-月-日	时:分:秒			
背景地震序列	2016-06-01	00:00:00	610	5.327	$1.016 \pm 0.015$
$M_L 5.5$ 前震序列	2018-02-04	03:30:00	0.75	3.080	$0.548 \pm 0.147$
$M_L 5.5$ 余震序列	2018-02-04	22:13:00	2	5.656	$1.128 \pm 0.037$
$M_L 6.0$ 序列	2018-02-06	23:53:00	2	5.657	$1.028 \pm 0.079$

### 1.3 修正的大森定律(余震衰减率)

由地震观测统计总结出的大森经验关系描述了余震序列随时间的发生频率, 即主震后余震次数随时间推移而逐步减小的过程。修正的大森定律 (Utsu, 1961) 的表达式一般为

$$r(t, M) = \frac{dN}{dt} = K \left[ 1 + \frac{t}{c(M)} \right]^{-p}, \quad (5)$$

式中:  $r(t, M)$  表示在  $t$  时间内震级大于  $M$  的余震发生率, 即单位时间内余震发生次数,  $t$  为主震后时间;  $c(M)$  为与震级有关的常数 (Pollitz, Johnston, 2006);  $p$  值的大小反映了余震发生率随时间衰减的快慢, 称之为衰减指数, 其取值一般接近于 1, 处于 0.8—1.5 之间, 该参数与起算震级的选取没有必然联系 (Utsu *et al.*, 1995);  $K$  值则一般被视为余震序列发生率 (productivity)。对式 (5) 进行积分, 可以得出地震累计次数与时间  $t$  的关系:

$$N(t, M) = \int_0^t r(t', M) dt' = \begin{cases} K \frac{c(M)}{p-1} \left\{ 1 - \left[ 1 + \frac{t}{c(M)} \right]^{1-p} \right\}, & p \neq 1, \\ K c(M) \ln \left( 1 + \frac{t}{c(M)} \right), & p = 1, \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中取  $M_c = 3.5$ 。采用最小二乘法对此次花莲地震序列的地震累计次数 (图 4a) 进行拟合, 表 2 与图 4 分别给出了利用修正的大森定律对  $M_L 5.5$  余震序列和  $M_L 6.0$  序列进行拟合所得到的  $K$ ,  $c(M)$ ,  $p$  值及其相应变化。其中图 4a 表示 2018 年 2 月 4 日地震开始后, 地震累计次数与时间的关系, 图 4b 与 4c 中的实际数据分别对应图 4a 中的  $M_L 5.5$  余震序列与  $M_L 6.0$  序列, 实线为利用修正的大森定律拟合出的曲线。

尽管修正的大森定律有广泛的实用性以及众多的相关研究, 可是  $K$  值和  $c$  值仍然没有一个明确且定性的物理解释, 但  $p$  值表示地震衰减率这一点毋庸置疑。从表 2 中可以看出,  $M_L 5.5$  余震序列与其同时间尺度的  $M_L 6.0$  序列 (2 天) 都可以用大森余震衰减规律描述, 且两段序列的  $p$  值都接近于 0.9, 这表明  $M_L 5.5$  余震序列与  $M_L 6.0$  序列具有相似的频次衰减特征。

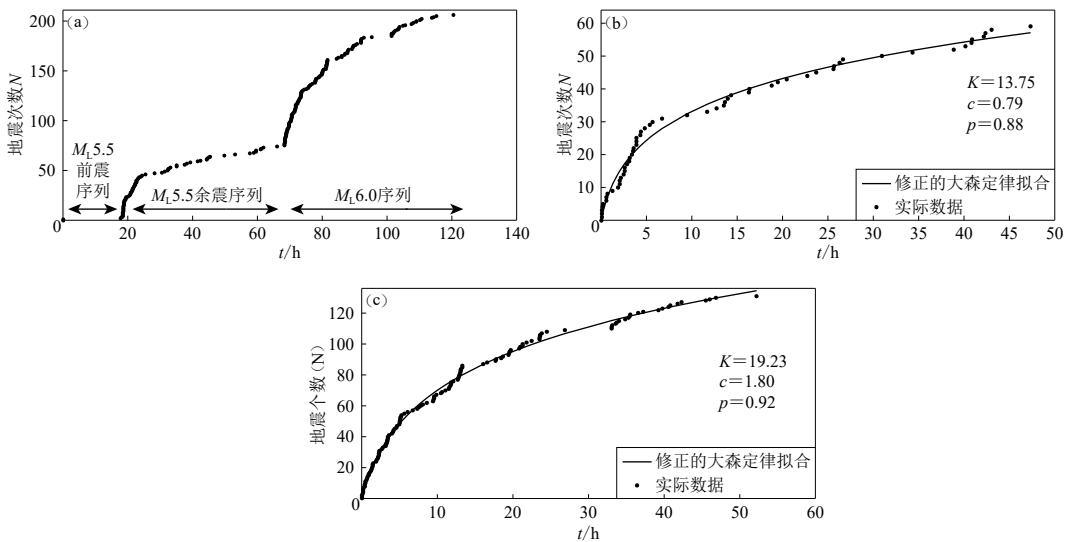


图 4 不同时段内修正的大森定律拟合的曲线图

(a) 自 2018 年 2 月 4 日地震后至 2 月 10 日花莲地区地震累计次数随时间的变化; (b) 利用修正的大森定律拟合  $M_{\text{L}} 5.5$  余震序列图; (c) 利用修正的大森定律拟合 2 天内  $M_{\text{L}} 6.0$  余震序列

Fig. 4 Curves fitted by the modified Omori's law with different time spans

(a) The cumulative number of events in Hualian area from February 4 to February 10; (b) Fitting  $M_{\text{L}} 5.5$  aftershock sequence; (c) Fitting  $M_{\text{L}} 6.0$  aftershock sequence in two days

表 2 通过修正的大森定律拟合得到的不同时间段的参数值

Table 2 Fitting parameters by the modified Omori's law with different time spans

地震序列	起始时间		持续时间/d	$K$	$c(M)$	$p$
	年-月-日	时:分:秒				
$M_{\text{L}} 5.5$ 余震序列	2018-02-04	22:16:00	2	13.75	0.79	0.88
$M_{\text{L}} 6.0$ 序列	2018-02-06	23:53:00	2	19.23	1.80	0.92

#### 1.4 修正的巴特定律(最大余震震级的估算)

巴特定律是评估主震后最大余震震级的经验定律, 它指出了主震后的最大余震震级一般比主震震级小 1—1.2 (Kisslinger, Jones, 1991), 但从整个花莲序列来看, 共发生 8 次震级  $M_{\text{L}} > 5.0$  的地震事件, 最大震级为  $M_{\text{L}} 6.0$ , 其次为  $M_{\text{L}} 5.5$ , 震级差  $\Delta M$  为 0.5, 在  $M_{\text{L}} 5.5$  序列中,  $M_{\text{L}} 5.5$  地震与  $M_{\text{L}} 5.5$  余震序列中最大余震震级差  $\Delta M$  为 0.4, 在  $M_{\text{L}} 6.0$  序列中, 主震与最大余震震级差  $\Delta M$  为 0.6. 很明显, 巴特定律并不适用于对此次花莲序列的描述, 这是因为虽然巴特定律在平均意义上是成立的, 但是对于特定区域的地震却不一定适用. 为了更准确地估计最大余震的震级, 研究人员依据古登堡-里克特定律提出了  $b$  值截距法 (吴开统等, 1984; 毛春长, 1989; 张智等, 1989), 该方法是将震级-频度图上通过古登堡-里克特定律拟合的曲线与  $N=1$  这条线段的交点所对应的震级值作为最大余震震级的估计值. 而 Shcherbakov 和 Turcotte (2004) 则依据古登堡-里克特定律修正了巴特定律, 称为 Scherbakov-Turcotte (缩写为 S-T) 方法, 提出了推定最大余震震级  $M_{\text{max}}^{\text{a}}$  这一概念, 且给出了推定最大余震震级的公式为

$$M_{\max}^a = \frac{a}{b}, \quad (7)$$

其中,  $M_{\max}^a$  为推定最大余震震级, 参数  $a$  与  $b$  为通过古登堡-里克特定律拟合出的  $a$  值与  $b$  值。利用式(7), Shcherbakov 和 Turcotte (2004) 对美国加州的 10 个中强地震余震序列进行了研究, 解孟雨等(2017) 也利用 S-T 方法成功估算出了九寨沟地震的最大余震震级, 并证实了该方法的可用性。但 S-T 方法实质上与  $b$  值截距法相同, 不同的仅是相应的描述方式。鉴于推定最大余震震级的含义和公式更为明确, 本文采用 S-T 方法估算最大余震震级。将表 1 的数据代入到式(7)中, 计算不同时间区间内的推定最大余震震级, 结果列于表 3。结果表明:  $M_{\text{L}}5.5$  余震序列的推定最大余震震级约为 5.0, 与实际最大余震  $M_{\text{L}}5.1$  相近, 震级误差约为 0.1;  $M_{\text{L}}6.0$  序列的推定最大余震震级约为  $M_{\text{L}}5.5$ , 与实际最大余震  $M_{\text{L}}5.4$  相近, 震级误差同样约为 0.1。这说明如果将  $M_{\text{L}}5.5$  余震序列作为独立的余震序列, 可以通过 S-T 方法在误差允许的范围内推定出该余震序列的最大余震震级。然而若设  $M_{\text{L}}6.0$  序列是  $M_{\text{L}}5.5$  序列的余震序列, 而  $M_{\text{L}}5.5$  余震序列的推定最大余震震级  $M_{\text{L}}5.0$  与  $M_{\text{L}}6.0$  序列中实际最大震级  $M_{\text{L}}6.0$  的差值近似为 1 且  $M_{\text{L}}6.0$  序列中震级  $\geq M_{\text{L}}5.0$  的地震至少有 3 次。因此,  $M_{\text{L}}6.0$  序列可能并非  $M_{\text{L}}5.5$  地震产生的余震序列, 但两者之间是否存有相关性(触发机制)仍需要进一步研究。

表 3 通过 S-T 方法计算得到的不同时间段的推定最大余震震级

Table 3 The estimated maximum aftershock magnitude by S-T method with different time spans

地震序列	起始时间		持续时间/d	推定最大震 震级 $M_{\max}^a$
	年-月-日	时:分:秒		
$M_{\text{L}}5.5$ 余震序列	2018-02-04	22:16:00	2	5.0
$M_{\text{L}}6.0$ 序列	2018-02-06	23:53:00	2	5.5

## 2 Dieterich 前震模型分析

对于前震的分析, 除了  $b$  值减小这一显著特征外, 本文进一步从前震的成因机制上进行了探讨。其中研究前震成因机制最具代表性的物理模型是 Dieterich 基于速率和状态摩擦定律总结并提出的两个前震模型, 称之为模型 I 和模型 II (Dieterich, Kilgore, 1996)。模型 I 表明主震是发生在前震之后的一个“余震”, 地震的发生是由震源区内更早时间发生的地震所产生的应力扰动所触发, 整个地震序列满足古登堡-里克特定律, 前震发生率及触发机制可以由 Dieterich 地震触发模型来量化表述(Dieterich, 1994)。模型 II 表明前震活动是由主震(例如  $M_{\text{L}}5.5$  主震)成核过程所产生的次级断裂所致。在此情况下, 主震断层成核的尺度远大于前震震源的尺度(Dieterich, 2007), 主震断层附近的剪切应力变化率正比于主震成核带内的滑移速率, 并且随时间增加而增加。因此, 剪切应变率上升可以造成前震发生频率的增加(Dieterich, Kilgore, 1996)。Dieterich 基于速率和状态摩擦定律, 结合弹簧-滑块模型, 认为断层成核过程中的滑动位移  $\delta$  可以表示为  $\delta = -A \ln(1 - t/t_{\text{inst}})/H$ , 其中,  $A$  为摩擦参量,  $H$  为一常数且与成核尺度相关,  $t_{\text{inst}} = A/(Hv_0)$  为成核至破裂发生的时间尺度(Dieterich, 1994)。如果对  $\delta$  在时间上作微分, 相应的滑移速率可以表示为  $\dot{\delta} = \dot{\delta}_0(1 - t/t_{\text{inst}})^{-1}$ 。当  $t$  接近  $t_{\text{inst}}$  时, 滑移速率  $\dot{\delta}$  趋于无穷大。基于上述相同的摩擦定律, Popov (2009) 也给出了与上述相似的结果, 并指出当滑移量分解为一系列尺度为 1 的离散量时, 前震的发生率(频度)  $\dot{N}$  可表示为

$$\dot{N} = \frac{a}{Hl(t_m - t)}, \quad (8)$$

式中,  $t_m$  为主震发生时刻. 这与 Scholz (2002) 提出的

$$\dot{N} = \alpha t^{-\omega} \quad (9)$$

相似, 式中  $\omega$  为一常数, 且接近于 1.

鉴于式(9)更为简洁, 本文以实测数据为基础, 利用式(9)拟合了  $M_L 5.5$  地震发生前 120 分钟内地震的发生率与时间的关系(图 5), 估算地震发生率的方法如下: 设一段地震序列中按时间顺序最先发生的地震为第 1 次地震, 随后出现第 2 次地震、第 3 次地震、…、第  $i$  次地震、第  $i+1$  次地震、…、第  $q$  次地震(最后 1 次地震), 则第  $i$  次地震的地震发生率公式为

$$R_i = \frac{1}{\Delta t'_i}, \quad \Delta t'_i = \frac{\Delta t_i + \Delta t_{i+1}}{2}, \quad i < q, \quad (10)$$

式中,  $t_i$  为第  $i$  次地震发生的时间,  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  为第  $i$  次地震距其上一次地震(第  $i-1$  次)发生的时间间隔,  $\Delta t'_i$  为第  $i-1$  次地震距第  $i+1$  地震的时间间隔的一半.

图 5 显示了越接近  $M_L 5.5$  地震发生的时刻,  $R$  值越相对较高, 这表明  $M_L 5.5$  前震序列的地震发生率总体上随时间而逐渐升高. 这与满足 Dieterich 前震模型 II 触发机制的地震序列所表现出的现象相同. 当  $\alpha = -4$ ,  $\omega = 1$  时, 拟合曲线与实际地震发生率相近. 再结合利用古登堡-里克特定律得出的  $M_L 5.5$  前震序列中  $b$  值的降低, 表明花莲序列中  $M_L 5.5$  前震序列的触发机制可能满足前震模型 II. 此外, 相比于  $M_L 5.5$  前震序列, 未发现  $M_L 6.0$  序列主震发生前 3 小时内有地震发生, 这说明  $M_L 6.0$  序列中没有类似  $M_L 5.5$  前震序列的明显的随着主震临近而加速发生的前震.

### 3 讨论与结论

在对  $M_L 5.5$  前震序列的力学成因机制的探讨中, 通过式(9)拟合出前震发生率正比于  $1/(t_m - t)$ , 其中  $t$  ( $t < t_m$ ) 为前震发生时刻,  $t_m$  为主震发生时间, 表明  $M_L 5.5$  前震序列的地震发生率随着  $M_L 5.5$  地震的临近而逐渐增加. 这一现象可以从 Dieterich 前震模型 II 中得到解释, 即前震的出现可能是由主震成核过程中滑移速率快速增加所导致的近断层次生断层失稳所致(Dieterich, Kilgore, 1996). 但是由于目前无法准确地估算断层成核过程的时间和尺度(Dieterich, Linker, 1992), 因此, 仅通过有限时间尺度的前震时空分布无法推测后续大震级地震的发生时间、尺度和位置. 此外也并不完全排除  $M_L 5.5$  前震序列的发震机制符合 Dieterich 前震模型 I 的可能性. 在计算  $b$  值时, 虽然利用最大似然法可以避免在半对数坐标下不同震级档数据权重的不对等性, 但利用平均震级计算, 也会导致在数据体震级覆盖范围较小时造成误差估计值偏大, 从而影响所算结果的稳定性.

$M_L 5.5$  序列与  $M_L 6.0$  序列在发生时间上非常接近(图 1), 其空间分布也有部分重合(图 2), 从而使得  $M_L 6.0$  序列中可能包含了  $M_L 5.5$  序列的余震. 由于主震发震初期大量地震事件集中

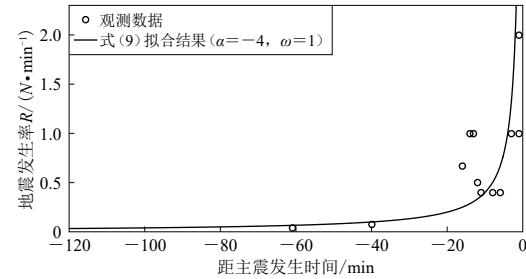


图 5  $M_L 5.5$  地震发生前 120 分钟内的地震发生率

Fig. 5 Seismicity rate within 120 minutes before the  $M_L 5.5$  earthquake

产生, 地面仪器在接受地震波信息时极有可能掺杂了短时间内众多地震事件辐射出的地震波信息, 但并未得到识别, 这样也可能会造成地震数目的缺失, 给目前的计算结果带来一定影响。 $M_{L5.5}$  与  $M_{L6.0}$  两个序列是否为恰好发生在相同断层的两次独立事件, 还是由于  $M_{L5.5}$  序列触发了  $M_{L6.0}$  序列, 这一点目前还无法从经验模型中得到完整的解释。因此, 花莲序列的触发机制仍是值得进一步研究的课题。需要强调的是, 采用物理和经验模型分析地震序列特征以及探讨其成因机制等都离不开一个完善的观测台网和可靠的震级评估手段。关于 2018 年 2 月初发生在中国台湾花莲东部海域地震序列, 前人的观点大多将此次花莲序列归集为前震-主震-余震型序列, 即  $M_{L5.5}$  序列为  $M_{L6.0}$  地震(主震)的前震, 而余震则为  $M_{L6.0}$  地震自身所触发的。本文将  $M_{L6.0}$  地震前的“前震序列”( $M_{L5.5}$  序列)分为  $M_{L5.5}$  前震序列与  $M_{L5.5}$  余震序列进行研究, 对其分别采用 3 个经验定律分析, 结果表明:  $M_{L5.5}$  余震序列、 $M_{L6.0}$  余震序列、背景地震序列的  $b$  值都近似为 1, 而  $M_{L5.5}$  前震序列的  $b$  值则近似为 0.5,  $M_{L5.5}$  余震序列和  $M_{L6.0}$  余震序列的  $p$  值接近 0.9, 由 S-T 方法估算  $M_{L5.5}$  和  $M_{L6.0}$  两个余震序列所得到的最大余震震级分别约为  $M_{L5.0}$  和  $M_{L5.5}$ , 与实际数据相比, 震级误差约为  $\Delta M=0.1$ 。针对  $M_{L5.5}$  前震发生率的拟合, 得到其发生率  $\dot{N}$  正比于  $1/(t_m-t)$ , 表明  $M_{L5.5}$  前震发生是逐渐加速的。这种现象可以从 Dieterich 和 Kilgore (1996) 提出的前震模型 II 中得到解释, 即前震序列的成因机制为主震成核过程中滑移速率的快速变化所导致的次生断裂的失稳。

中国台湾气象局(2018)为本文提供了 2016 年 6 月 1 日至 2018 年 3 月 30 日发生在台湾花莲区域内  $M_{L}\geq 2.0$  的地震事件和相关历史地震数据(数据收录时间为 2018 年 4 月 3 日), USGS (2018)为本文提供了花莲地区构造特征数据, 作者在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 毛春长. 1989. 利用  $B$  值截距法估计强余震震级 [J]. 山西地震, (3): 41-42.
- Mao C C. 1989. Estimating strong aftershock magnitude by  $B$ -value intercept method [J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (3): 41-42 (in Chinese).
- 台湾气象局. 2018. 地震测报中心 [EB/OL]. [2018-04-03]. <http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>.
- Taiwan Weather Bureau. 2018. Earthquake monitoring and reporting center [EB/OL]. [2018-04-03]. <http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>.
- 吴开统, 焦远碧, 王志东. 1984. 华北地区的晚期强余震特征 [J]. 西北地震学报, 6(2): 35-43.
- Wu K T, Jiao Y B, Wang Z D. 1984. Certain characteristics of late strong aftershocks of North China [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 6(2): 35-43 (in Chinese).
- 解孟雨, 孟令媛, 申文豪, 史保平. 2017. 基于 Gutenberg-Richter 定律快速估算最大余震震级: 以 2017 年九寨沟  $M_{S}7.0$  地震为例 [J]. 中国地震, 33(4): 493-502.
- Xie M Y, Meng L Y, Shen W H, Shi B P. 2017. Fast estimating of the largest aftershock's magnitude based on the Gutenberg-Richter law: A case study of the 2017 Jiuzhaigou  $M_{S}7.0$  earthquake sequence [J]. *Earthquake Research in China*, 33(4): 493-502 (in Chinese).
- 张智, 吴开统, 焦远碧, 张天润. 1989. 用  $b$  值横截距预报强余震震级的方法探讨 [J]. 中国地震, 5(4): 59-69.
- Zhang Z, Wu K T, Jiao Y B, Zhang T R. 1989. Discussion on the prediction method for magnitude of strong aftershock with the crosscut way of  $b$ -value [J]. *Earthquake Research in China*, 5(4): 59-69 (in Chinese).
- Chan C H, Ma K F, Lee Y T, Wang Y J. 2019. Rethinking seismic source model of probabilistic hazard assessment in Taiwan after the 2018 Hualien, Taiwan, earthquake sequence [J]. *Seismol Res Lett*, 90(1): 88-96.

- Dieterich J H, Linker M F. 1992. Fault stability under conditions of variable normal stress[J]. *Geophys Res Lett*, **19**(16): 1691–1694.
- Dieterich J H. 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering[J]. *J Geophys Res*, **99**(B2): 2601–2618.
- Dieterich J H, Kilgore B. 1996. Implications of fault constitutive properties for earthquake prediction[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **93**(9): 3787–3794.
- Dieterich J H. 2007. Applications of rate- and state-dependent friction to models of fault slip and earthquake occurrence[G]//*Treatise on Geophysics*. Boston: Elsevier: 107–129.
- Hamdache M, Peláez J A, Kijko A, Smit A. 2017. Energetic and spatial characterization of seismicity in the Algeria-Morocco region[J]. *Nat Hazards*, **86**(S2): 273–293.
- Helmstetter A, Sornette D, Grasso J R. 2003. Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks: How do foreshock statistical properties emerge from aftershock laws[J]. *J Geophys Res*, **108**(B1): 2046.
- Jian P R, Hung S H, Meng L S. 2018. Rupture behavior and interaction of the 2018 Hualien earthquake sequence and its tectonic implication[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 68–77.
- Jones L M. 1985. Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(6): 1667–1679.
- Kisslinger C, Jones L M. 1991. Properties of aftershock sequences in southern California[J]. *J Geophys Res*, **96**(B7): 11947–11958.
- Kuo Y T, Wang Y, Hollingsworth J, Huang S Y, Chuang R Y, Lu C H, Hsu Y C, Tung H, Yen J Y, Chang C P. 2018. Shallow fault rupture of the milun fault in the 2018  $M_w$ 6.4 Hualien earthquake: A high-resolution approach from optical correlation of Pléiades satellite imagery[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 97–107.
- Lin C M, Kuo C H, Huang J Y, Chao S H, Hsu T Y, Wen K L. 2018. Strong ground motion and pulse-like velocity observations in the near-fault region of the 2018  $M_w$ 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 40–50.
- Ma K F, Wu Y M. 2018. Preface to the focus section on the 6 February 2018  $M_w$ 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 15–18.
- Marzocchi W, Sandri L. 2003. A review and new insights on the estimation of the  $b$ -value and its uncertainty[J]. *Ann Geophys*, **46**(6): 1271–1282.
- Pollitz F F, Johnston M J S. 2006. Direct test of static stress *versus* dynamic stress triggering of aftershocks[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(15): L15318.
- Popov V L. 2009. *Contact Mechanics and Friction*[M]. Berlin: Springer: 323–342.
- Sandri L, Marzocchi W. 2007. A technical note on the bias in the estimation of the  $b$ -value and its uncertainty through the least squares technique[J]. *Ann Geophys*, **50**(3): 329–339.
- Scholz C H. 2002. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*[M]. New York: Cambridge University Press: 358–380.
- Shcherbakov R, Turcotte D L. 2004. A modified form of Båth's law[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(5): 1968–1975.
- USGS. 2018. Earthquake hazards program[EB/OL]. [2018-04-03]. <https://earthquake.usgs.gov/>.
- Utsu T. 1961. A statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. *Geophys Mag*, **30**: 521–605.
- Utsu T, Ogata Y, Ritsuko S, Matsu'ura. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity[J]. *J Phys Earth*, **43**(1): 1–33.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4): 859–869.
- Zúñiga F R, Wyss M. 1995. Inadvertent changes in magnitude reported in earthquake catalogs: Their evaluation through  $b$ -value estimates[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **85**(6): 1858–1866.