

解孟雨、孟令媛、申文豪等,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,中国地震,33(4),493~502。

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

解孟雨¹⁾ 孟令媛²⁾ 申文豪³⁾ 史保平¹⁾

1) 中国科学院大学地球科学学院,北京市玉泉路 19 号(甲) 100049

2) 中国地震台网中心,北京 100045

3) 中国地震局地壳应力研究所,北京 100085

摘要 针对九寨沟 M_s 7.0 地震之后不同时间段的余震序列目录,利用推定最大余震震级,给出了实际最大余震震级的估计值。结果表明,推定最大余震震级随主震后时间尺度的延长而趋于稳定,且该值与实际发生的最大余震的震级一致。需要强调的是,就九寨沟地震序列而言,当余震数据较为完备时,采用主震后较短时间段内(1~2 天)的余震目录就可以较准确地估算出主震区域内可能发生的最大余震震级。实际上,主震后 12h(0.5 天)的余震数据已完全可以给出最大余震震级的有效下限。此外,计算中我们采用了里氏震级 M_L 和面波震级 M_s 的余震目录,结果显示,2 种震级类型目录的估算结果完全一致,表明利用推定最大余震震级估算实际最大余震震级的方法不受震级类型的影响。据此,该最大余震震级快速评估方法可进一步推广应用于我国大陆地区中强震后强余震灾害分析评估中。目前的拟合技术也显示出随着测震技术的不断进步以及余震识别能力的提高,快速评估方法可以在主震后短时间(<1 天)内准确地预测可能发生的最大余震震级。

关键词: 最大余震震级 推定最大余震 九寨沟 M_s 7.0 地震 Gutenberg-Richter 定律
完备震级

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0493-10 [中图分类号] P315.9 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网中心测定,2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分四川省阿坝州九寨沟县发生 M_s 7.0 地震(以下简称九寨沟地震),震中 33.22°N 、 103.83°E ,震源深度 20km,矩震级 M_w 6.5。地震震中位于岷江断裂、塔藏断裂和虎牙断裂附近,推测其发震构造为塔藏断裂南侧分支或虎牙断裂北段。此次地震是继 2008 年汶川 M_s 8.0 地震和 2013 年芦山 M_s 7.0 地震后在青藏

[收稿日期] 2017-10-23; [修定日期] 2017-11-07

[项目类别] 国家国际科技合作专项(2015DFA21260)资助

[作者简介] 解孟雨,男,1991 年生,在读博士研究生,主要从事地震触发机制、地震演化数值模拟和余震序列等方面的研究。E-mail:jiemengyu13@mails.ucas.ac.cn

高原东缘发生的又一次破坏性地震,据统计,截至8月13日20时,地震共造成25人死亡,525人受伤,6人失联。九寨沟县17个乡镇的1680户房屋受损,52个风景名胜中的30个受到影响,造成较为严重的人员经济损失。

中强地震发生之后,常伴随着一系列震级小于主震震级的地震,即余震。主震发生后为了避免较大余震产生的2次危害,有必要快速准确地预测主震震中周边余震的时空分布以及可能发生的最大余震。对于最大余震的震级,Båth(1965)指出,主震震级与最大余震震级之差 ΔM 是不受主震震级影响的常数(即贝特定律)

$$\Delta M = M_{\text{main}} - M_{\text{RLA}} \quad (1)$$

其中, M_{main} 为主震震级; M_{RLA} 为最大余震震级;且 ΔM 的平均值约为1.2。研究该定律对于理解地震破裂过程和余震发生规模有着重要意义(Shcherbakov et al, 2005; Shearer, 2012; Rodríguez-Pérez et al, 2016)。众多研究者对 ΔM 的大小、影响因素及物理机制等进行了研究,结果显示,贝特定律的存在表明地震触发机制中存在一定程度的自相似过程(Console et al, 2003; Shearer, 2012; Žalohar, 2014);贝特定律并不严格适合所有余震序列,常数 ΔM 仅在平均意义上接近1.2(Kisslinger et al, 1991; Console et al, 2003; Shcherbakov et al, 2005, 2013; Shearer, 2012; Tahir et al, 2012),其值为0~3(Kisslinger et al, 1991; Helmstetter et al, 2003; Shcherbakov et al, 2004, 2013; 蒋海昆, 2010),且可能受震源机制(苏有锦等, 2008; Tahir et al, 2012; Rodríguez-Pérez et al, 2016)、断层之间的相互作用情况(Žalohar, 2014)、震源深度(Båth, 1965; 苏有锦等, 2014)、地震序列类型(苏有锦等, 2014)、区域构造特征(Rodríguez-Pérez et al, 2016)等因素的影响。为了更好地估计最大余震震级,我国学者依据 Gutenberg-Richter 定律(以下简称 G-R 定律)首先提出了 b 值截距法(吴开统等, 1984; 毛春长, 1989; 张智等, 1989; 国家地震局科技监测司, 1990)。该方法是将震级-频度图上 G-R 定律的拟合曲线与震级轴交点的震级值作为最大余震震级的估计值。之后,研究者一方面不断验证该方法;另一方面,利用该方法估计最大余震震级,同时也计算了在震后不同时间内估计结果的变化情况(刘正荣, 1995; 钱晓东等, 2008; 苏有锦等, 2008, 2014; 付虹等, 2008)。研究结果显示,虽然使用该方法得到的最大余震震级存在一定的偏差,但考虑到误差的影响,该方法仍可以很好地估计最大余震震级。在国外,Shcherbakov 等(2004)依据 G-R 定律提出了改进贝特定律,并用于对美国加州包括 Landers 7.3 级地震在内的 10 个中强地震余震序列的研究。他们提出了推定最大余震震级 M_{ILA} 的概念,并给出了 M_{ILA} 的计算公式,其实质与 b 值截距法相同,不同的仅是相应的描述方式。与 b 值截距法一样,对于不同余震序列,计算得到的推定最大余震震级 M_{ILA} 与真实最大余震震级 M_{RLA} 也基本一致(Shcherbakov et al, 2004, 2013)。鉴于推定最大余震震级 M_{ILA} 的含义更为明确,故本文采用推定最大余震震级 M_{ILA} 进行方法说明。本文利用推定最大余震震级 M_{ILA} 的计算公式,针对九寨沟地震余震序列,探讨了在不同时间尺度下提取最大余震震级估算值的可行方案,并与实际测量值进行比较。依据对九寨沟地震余震序列的计算和结果分析,本文给出了快速评估最大余震震级的方法。

1 数据及完备性分析

本文选取九寨沟地震发震后至10月5日3时18分(主震发生后约57天)的余震数据用于建模和参数确定,该目录来源于中国地震台网中心,其中包含里氏震级 M_L 和面波震级

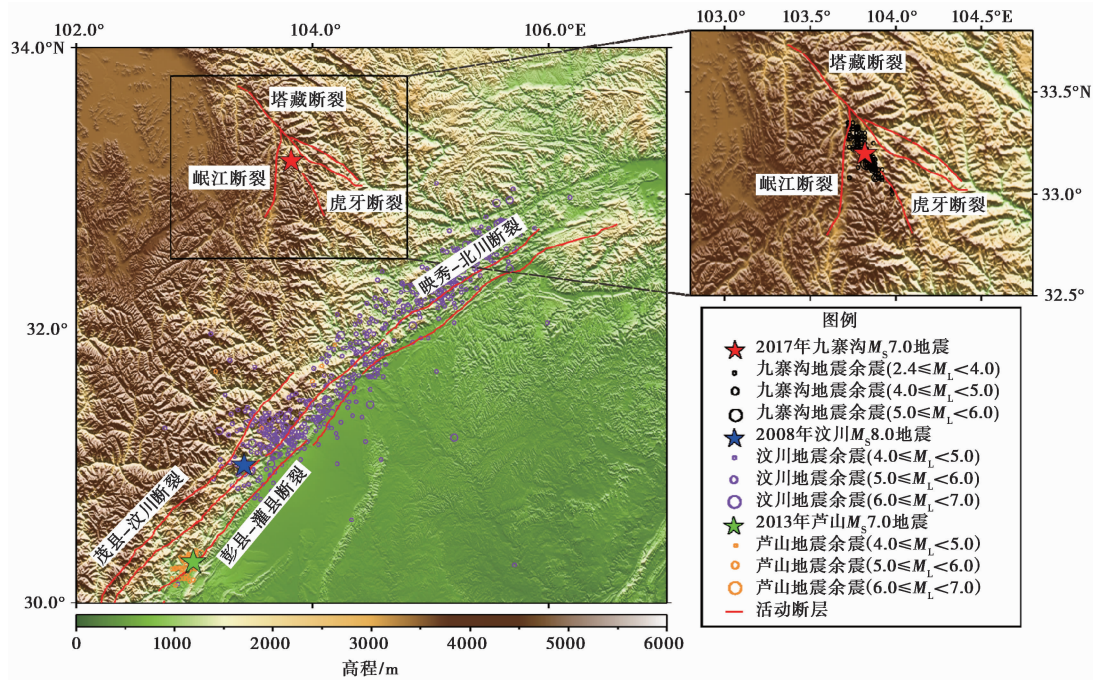


图 1 九寨沟地震余震分布与周边近期发生的强震

M_s 两类数据。若仅考虑里氏震级目录, 则共有余震事件 5864 个, $M_L \geq 3.0$ 事件共 92 个, 其中, $3.0 \leq M_L < 4.0$ 地震 78 次, $4.0 \leq M_L < 5.0$ 地震 13 次, $5.0 \leq M_L < 6.0$ 地震 1 次。特别需要强调的是, 在所选取的地震目录中, 最大震级的余震为 8 月 9 日 10 时 17 分 (距主震发生时刻约 0.54 天) 发生的 M_L 5.2 (或 M_s 4.8) 地震。图 1 为九寨沟地震余震的空间分布情况。由图 1 可见, 九寨沟地震震中位于汶川 M_s 8.0 地震、芦山 M_s 7.0 地震震中的北侧, 且九寨沟地震余震主要集中于主震附近, 近似条带状分布。在使用地震目录的数据时, 首先应确定目录的完备震级 M_c , 即在给定的时间、空间范围内可全部测定地震的最小震级。如果完备震级 M_c 的估算值太高, 则会导致地震数据使用不充足, 不能获得完整的地震信息; 而太低的完备震级 M_c 值又会引入记录不完整的数据, 导致错误的模型参数估计, 进而得出错误的结论 (Mignan et al, 2012; 蒋长胜等, 2013)。因此, 对于九寨沟地震的余震序列, 我们需要选择和确定快速且准确的完备震级 M_c 估算方法。完备震级的估算方法主要有最大曲率、GFT、EMR、MBS 等方法 (Hamdache et al, 2017), 其中, 利用最大曲率 (以下简称 MAXC) 方法进行计算, 能较为适合快速评估的需要。首先, 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 , 因而它不需要任何的参数拟合, 是一种快速直接且对数据强健的方法 (Mignan et al, 2012)。此外, Mignan 等 (2012) 还指出, MAXC 方法也可在目录数据较少的情况下得出合理的完备震级, 适合在主震发生后短时间内估算完备震级 M_c 的大小。不过 MAXC 方法会低估地震目录的完备震级, 因此, 为更接近实际真值, 可以添加相应的修正系数, 即 $M_c = M_c(\text{MAXC}) + 0.2$ (Woessner et al, 2005)。

因此, 本文采用修正的 MAXC 方法对九寨沟地震的余震目录进行完备震级的估算。对

于估算完备震级的余震目录,我们选择主震后 2h(约为 0.083 天)内的余震序列目录。之所以采用这样的选择,一方面是为了能够在主震发生后很短的时间尺度下快速得到完备震级,另一方面也是由于采用余震序列早期的目录才可得到较为准确的完备震级(Enescu et al, 2002;米琦等,2015)。经过对九寨沟地震 2 类目录(里氏震级 M_L 、面波震级 M_S 目录)的计算得到,对于里氏震级 M_L 的余震目录,其完备震级 M_c 约为 2.4;而震级类型为面波震级 M_S 的余震目录,其完备震级 $M_c=1.6$ 。2 类目录完备震级估算值的不确定度均约为 0.007,可忽略不计。

2 最大余震震级的估算

无论是全球尺度的地震还是区域尺度的地震,除去少数个例,基本都满足 Gutenberg-Richter 定律(简称 G-R 定律)(Marzocchi et al, 2003; Shcherbakov et al, 2004),即在给定区域和时间段内,其震级大于等于 M 的地震总个数 $N(\geq M)$, 满足

$$\lg N(\geq M) = a - bM \tag{2}$$

其中, $M \geq M_c$; a, b 为正常数, a 给出了选定区域和时间段内 0 级以上地震个数的对数,它依赖于选定区域和观测数据时间尺度的大小(Hamdache et al, 2017),而 b 值则刻画了区域内不同震级地震的相对分布情况(Hamdache et al, 2017),其值为 0.6 ~ 1.4(Marzocchi et al, 2003; Shcherbakov et al, 2004; Wang et al, 2015; Hamdache et al, 2017)。 b 值的大小与区域应力状态和断层的破裂过程有关,可用来指示区域地震危险性水平(吴开统等, 1984; Hamdache et al, 2017)。

对于余震序列而言, G-R 定律依旧成立。在这种情况下, $N(\geq M)$ 表示余震序列中满足震级大于等于 $M(M \geq M_c)$ 的地震的个数,而且对于余震序列,相应 b 的取值范围也与区域或全球的统计结果一致(Shcherbakov et al, 2004)。图 2 为九寨沟地震发生后 1 天内余震目录

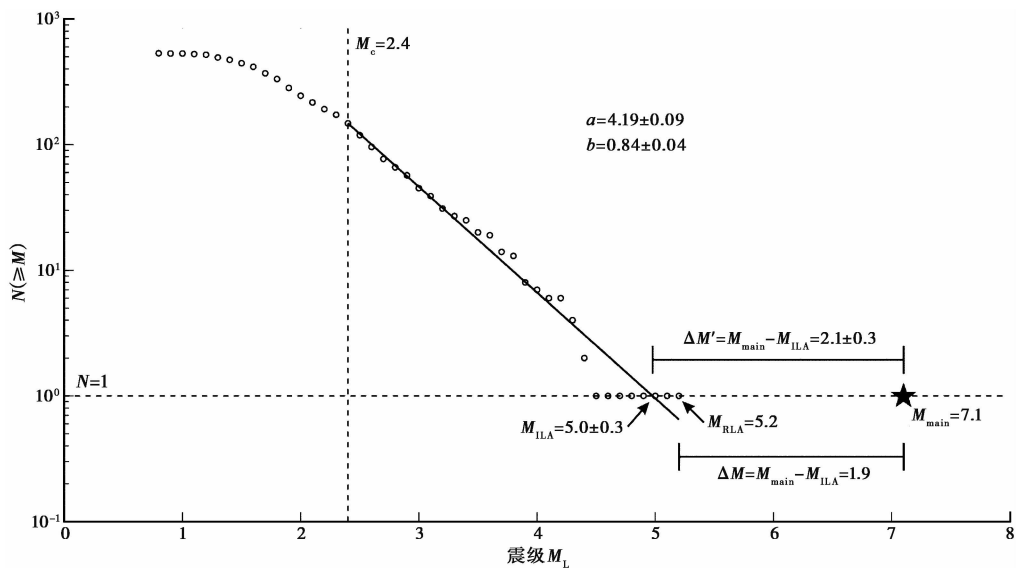


图 2 九寨沟地震发生后 1 天内余震目录的震级-频度图

圆圈为观测数据;实线为 G-R 定律的拟合曲线;五角星为九寨沟地震(M_L 7.1);所有余震均使用里氏震级 M_L

的震级-频度图。由图 2 可见, 对于实际余震目录而言, $N=1$ 的最大震级档 ($M=5.2$) 即为主震之后最大余震震级 M_{RLA} , 即 $N(\geq M_{RLA})=1$ 。据此, Shcherbakov 等 (2004) 定义推定最大余震震级 M_{ILA} 为用 G-R 定律描述的余震震级-频度分布满足 $N(\geq M)=1$ 时的地震震级档 M (图 2), 即

$$a = bM_{ILA} \tag{3}$$

于是, 贝特定律可改写为

$$\Delta M' = M_{main} - M_{ILA} \tag{4}$$

式 (4) 即为 Shcherbakov 等 (2004) 提出的改进贝特定律。Shcherbakov 等 (2004) 利用改进贝特定律分析了加州 1987~2003 年间发生的 10 个震级大于 5.5 级地震的最大余震震级, 结果显示, 由该定律得到的推定最大余震震级 M_{ILA} 或震级差 ($\Delta M'$) 与实际值一致。因此, 本文中我们使用推定最大余震震级 M_{ILA} (式 (3)) 估计实际最大余震震级 M_{RLA} 。

为了计算推定最大余震震级 M_{ILA} , 首先要估算出 b, a 值。对于 b 值的估计, 可采用最小二乘法 and 最大似然法。前人的研究指出, 利用最小二乘法计算的 b 值存在系统性偏差 (Sandri et al, 2007; Hamdache et al, 2017)。因此, 本文选择 Marzocchi 等 (2003) 描述的最大似然法估计 b 值。具体而言, b 值及不确定度 δ_b (Uncertainty) 的计算公式为

$$b = \frac{1}{\ln(10) [\bar{M} - (M_c - dM/2)]} \tag{5}$$

$$\delta_b = \frac{b}{\sqrt{N}} \tag{6}$$

其中, \bar{M} 为计算地震目录的平均震级; dM 为震级间隔, 对于仪器测定的地震震级, $dM=0.1$ (Marzocchi et al, 2003); N 为计算目录中事件的总个数。另外, Marzocchi 等 (2003) 通过对比式 (5) 与其他最大似然法的计算结果, 进一步指出利用式 (5) 可对较大的 b 值进行有效的估算, 并且在地震震级存在误差的情况下, 仍可以有效地估算 b 值。 a 值由下式得出

$$a = \lg N(\geq M_c) + bM_c \tag{7}$$

而相应的不确定度 δ_a 为 (Taylor, 1997) (完备震级 M_c 的不确定度约为 0.007; 相对于 b 值的不确定度可忽略不计)

$$\delta_a = bM_c \tag{8}$$

于是, 推定最大余震震级 M_{ILA} 的不确定度 $\delta_{M_{ILA}}$ 可表示为 (Taylor, 1997)

$$\delta_{M_{ILA}} = \frac{\delta_a}{a} + \frac{\delta_b}{b} \tag{9}$$

3 结果分析与讨论

针对九寨沟地震的余震序列, 我们分别对里氏震级 M_L 目录和面波震级 M_s 目录计算了不同时间尺度下推定最大余震震级 M_{ILA} 。图 3、图 4、表 1 和表 2 为相应的计算结果。由图 3 (a)、3 (c)、4 及表 1、2 可见, 随着选取余震目录时间范围 (即从主震发生后到截止时刻经过的时间) 的不断扩大, 推定最大余震震级 M_{ILA} 逐渐增大并稳定于固定值。对于里氏震级 M_L 目录而言, 该值为 $M_{ILA} = 5.3 \pm 0.1$; 而对于面波震级 M_s , 则为 $M_{ILA} = 5.0 \pm 0.1$, 这与实际测得的最大余震震级基本一致 ($M_{RLA} = M_L 5.2$ 或 $M_{RLA} = M_s 4.8$)。这也说明利用推定最大余震震级

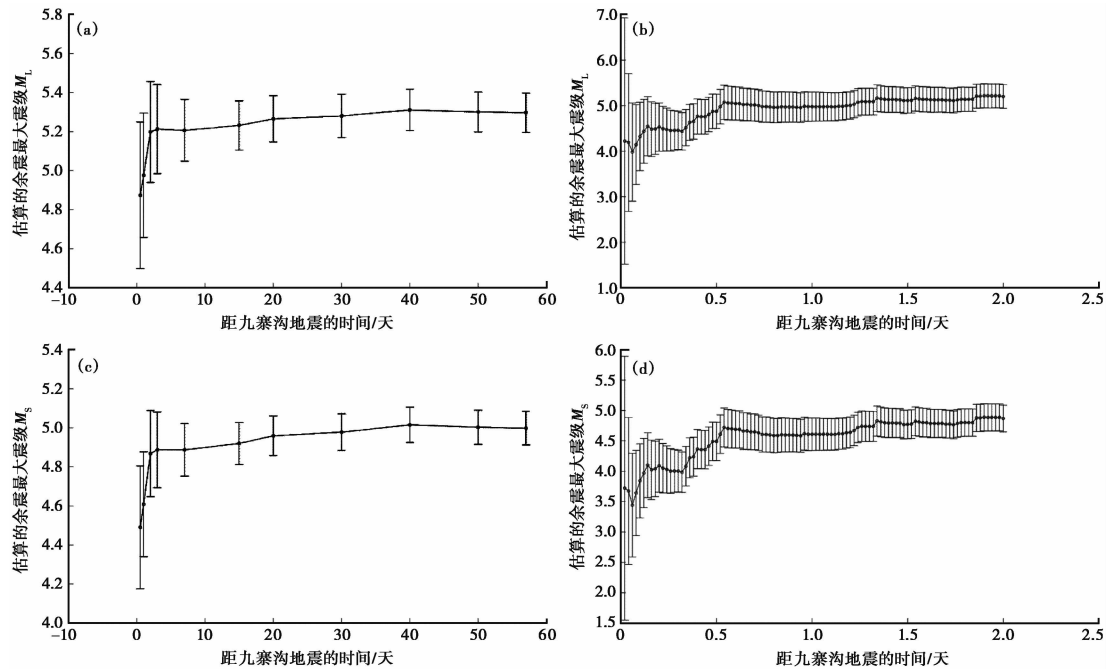


图3 不同时间尺度下由九寨沟地震序列得到的推定最大余震震级 M_{ILA} 随时间变化的误差棒图
 图(a)、(b)、(c)、(d)分别为由里氏震级 M_L 目录、面波震级 M_S 目录计算的结果,其中,零时刻表示主震发生的时刻

M_{ILA} 可对最大余震震级进行有效估算,并且不受地震目录中震级类型的限制,即可获得与实际观测较一致的数值。而 M_{ILA} 的不确定度随时间的流逝不断减少,这是由于随时间的增加,地震目录不断增加,有效信息不断增多。这也提醒我们,如果能加强台网对余震的识别能力,增加余震数据,就可以给出更为准确的推定最大余震震级。

对于较小的截止时间,即较短的余震目录时间,图3(b)、3(d)显示,在0.6天(14.4h)之前推定最大余震震级 M_{ILA} 并不稳定,并且整体上不确定性较大(余震个数较少,信息不足)。不过,随着截止时间的增加, M_{ILA} 的值趋于稳定。截止时间为1、2天的 M_{ILA} 值分别为 5.0 ± 0.3 (M_L)、 4.6 ± 0.3 (M_S) 和 5.2 ± 0.3 (M_L)、 4.9 ± 0.2 (M_S),这些值与实际测得的最大余震震级 M_{RLA} (M_L 5.2 和 M_S 4.8) 基本一致。因此,在短时间内,仍可以利用推定最大余震震级 M_{ILA} 估算最大余震震级 M_{RLA} ,而且也依然不受震级类型的影响。此外,在实际最大震级余震发生前(约为0.53天前),由于地震目录中余震个数较少,利用0.5天的数据得到的推定最大余震震级 M_L (4.9 ± 0.4) 和 M_S (4.5 ± 0.3) 均小于实际最大余震震级 M_{RLA} ($M_{RLA} = M_L 5.2$ 或 $M_{RLA} = M_S 4.8$),不过它们却可以作为 M_{RLA} 值的合理下界,这也说明利用推定最大余震震级确实可以有效地预测最大余震震级。据此,在主震发生后利用推定最大余震震级,我们可以在1天或2天时得到较为合理的最大余震里氏震级或面波震级的估计值;另一方面,在更短的时间内(0.5天或12h),对于现有台网识别得到的余震数据,利用推定最大余震震级可以给出 M_{RLA} 合适的下界。随着台网识别能力的提升,一方面可以增加各个震级余震的个数 N ,降低不同参数的不确定度,进而得到更为准确的 M_{RLA} 估计值;另一方面也会降低完备震级 M_c 。在主震后短时间内就可有大量可使用的余震数据,实现在更短时间内得出 M_{RLA} 的有效估计值。

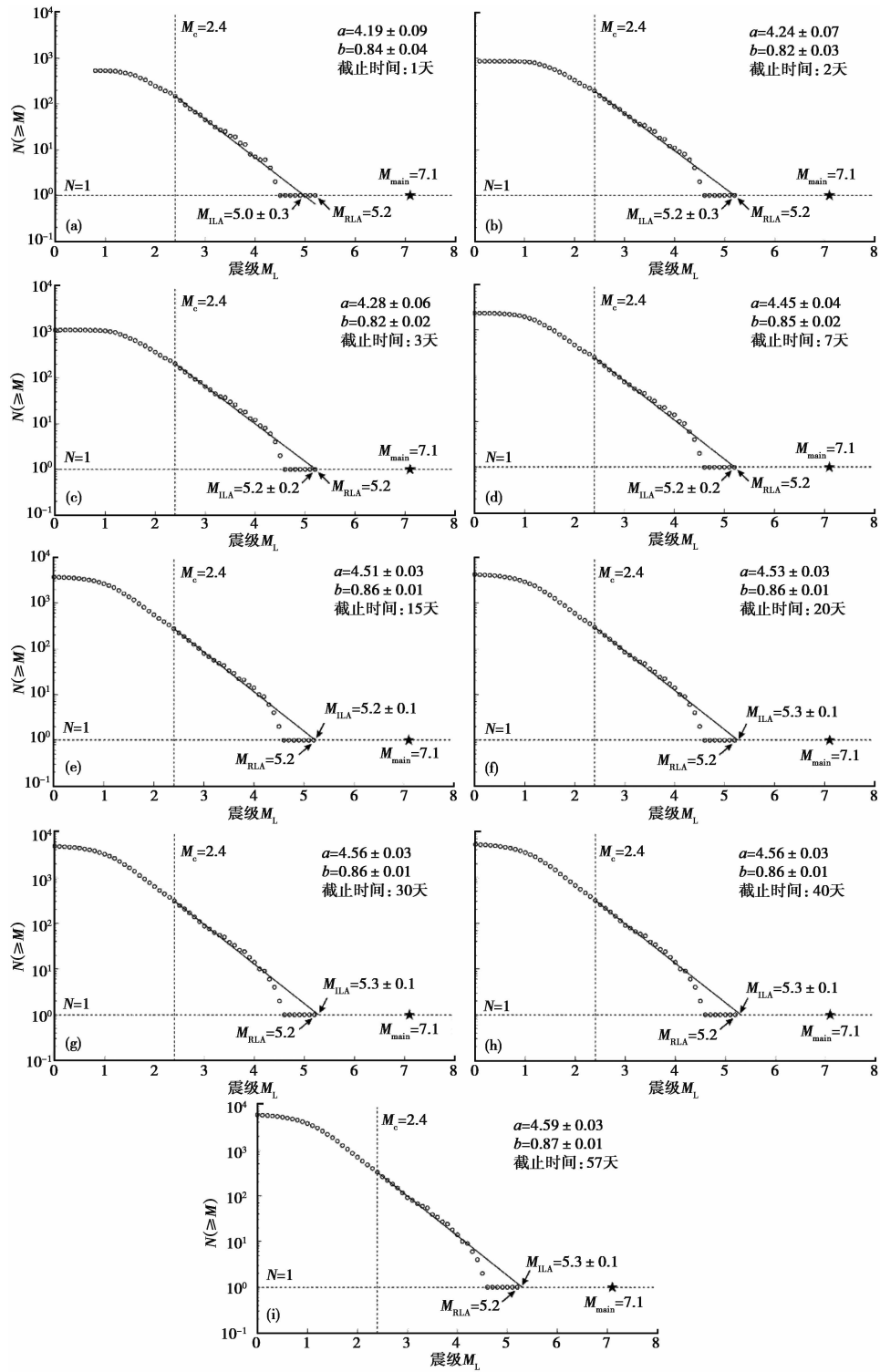


图 4 九寨沟地震发生后不同时间段内余震目录的震级-频度图

圆圈为观测数据；实线为 G-R 定律的拟合曲线；五角星表示九寨沟地震 ($M_L 7.1$)；所有余震使用的均是里氏震级 M_L

表1 不同时间尺度下计算得到的九寨沟地震
推定最大余震里氏震级 $M_{ILA}(M_L)$

截止时间/天	a	b	M_{ILA}
0.5	4.06±0.10	0.83±0.04	4.9±0.4
1	4.19±0.09	0.84±0.04	5.0±0.3
2	4.24±0.07	0.82±0.03	5.2±0.3
3	4.28±0.06	0.82±0.02	5.2±0.2
7	4.45±0.04	0.85±0.02	5.2±0.2
15	4.51±0.03	0.86±0.01	5.2±0.1
20	4.53±0.03	0.86±0.01	5.3±0.1
30	4.56±0.03	0.86±0.01	5.3±0.1
40	4.56±0.03	0.86±0.01	5.3±0.1
50	4.59±0.03	0.87±0.01	5.3±0.1
57	4.59±0.03	0.87±0.01	5.3±0.1

表2 不同时间尺度下计算得到的九寨沟地震
推定最大余震面波震级 $M_{ILA}(M_S)$

截止时间/天	a	b	M_{ILA}
0.5	3.20±0.06	0.71±0.04	4.5±0.3
1	3.32±0.05	0.72±0.03	4.6±0.3
2	3.40±0.04	0.70±0.02	4.9±0.2
3	3.43±0.03	0.70±0.02	4.9±0.2
7	3.56±0.02	0.73±0.02	4.9±0.1
15	3.61±0.02	0.73±0.01	4.9±0.1
20	3.64±0.02	0.73±0.01	5.0±0.1
30	3.66±0.02	0.74±0.01	5.0±0.1
40	3.67±0.02	0.73±0.01	5.0±0.1
50	3.69±0.02	0.74±0.01	5.0±0.1
57	3.69±0.02	0.74±0.01	5.0±0.1

4 结论

本文以2017年九寨沟 $M_S 7.0$ (或 $M_L 7.1$) 地震震后57天的余震目录(包含 M_L 、 M_S 目录)为资料,通过对余震目录完备震级、 a 值和 b 值的计算,并利用推定最大余震震级,在不同时间尺度上估算了九寨沟地震的最大余震震级。结果显示,推定最大余震震级可有效地预测最大余震震级,并给出合理的估计值。具体而言,在长时间尺度上推定最大余震震级可以给出与实际观测最大余震震级一致的估计值;而在短时间尺度上,1、2天的结果也可作为最大余震震级的合适估计,且0.5天(12h)的结果就可作为最大余震震级的合理下界。

此外,利用推定最大余震震级估计实际最大余震震级的方法,不受震级类型的限制,对于 M_S 、 M_L 目录均可得到较好的结果。因此,我们建议可采用以下步骤进行最大余震震级的快速评估:①根据震后2h的目录,利用修正的MAXC方法计算完备震级;②利用推定最大余震震级分别在主震后12h、1天、2天时估算最大余震震级,将其分别作为最大余震震级的下界和估计值。另外,计算结果也显示,如果可以提高余震的识别能力,利用推定最大余震震级则可在短时间内给出更准确的最大余震震级的估计值。

参考文献

- 付虹、郇成栋,2008,川滇地区 $M \geq 7$ 地震早期衰减特征与汶川8.0级地震强余震预测,地震研究,31(增刊I),430~435。
- 国家地震局科技监测司,1990,地震学分析预报方法程序指南,23~25,北京:地震出版社。
- 蒋长胜、吴忠良、韩立波等,2013,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,地球物理学报,56(12),4048~4057。
- 蒋海昆,2010,5·12汶川8.0级地震序列震后早期趋势判定及有关问题讨论,地球物理学进展,25(5),1528~1538。
- 刘正荣,1995, b 值特征的研究,地震研究,18(2),168~173。
- 毛春长,1989,利用 b 值截距法估计强余震震级,山西地震,(3),41~43。
- 米琦、申文豪、史保平,2015,基于经验模型和物理模型研究2013 $M_S 7.0$ 芦山地震余震序列,地球物理学报,58(6),1919~1930。

- 钱晓东、秦嘉政, 2008, 用 b 值截距估算汶川 8.0 级地震序列最大余震, 地震研究, **31**(增刊 I), 436~441。
- 苏有锦、李中华、赵小艳等, 2014, 全球 7 级以上地震序列研究, 昆明: 云南大学出版社。
- 苏有锦、赵小艳, 2008, 全球 8 级地震序列特征研究, 地震研究, **31**(4), 308~316。
- 吴开统、焦远碧、王志东, 1984, 华北地区的晚期强余震特征, 西北地震学报, **6**(2), 3~43。
- 张智、吴开统、焦远碧等, 1989, 用 b 值横截距预报强余震震级的方法探讨, 中国地震, **5**(4), 59~69。
- Báth M, 1965, Lateral inhomogeneities of upper mantle, *Tectonophysics*, **2**(6), 483~514.
- Console R, Lombardi A M, Murru M, et al, 2003, Báth's law and self-similarity of earthquakes, *J Geophys Res*, **108**(B2), 1~23.
- Enescu B, Ito K, 2002, Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake, *Earth Planets and Space*, **54**(8), 847~859.
- Hamdache M, Pelaez J A, Kijko A, et al, 2017, Energetic and spatial characterization of seismicity in the Algeria-Morocco region, *Natural Hazards*, **86**, S273~S293.
- Helmstetter A, Sornette D, 2003, Báth's law derived from the Gutenberg-Richter law and from aftershock properties, *Geophys Res Lett*, **30**(20), 1~4.
- Kisslinger C, Jones L M, 1991, Properties of aftershock sequences in southern California, *J Geophys Res-Solid Earth and Planets*, **96**(B7), 11947~11958.
- Marzocchi W, Sandri L, 2003, A review and new insights on the estimation of the b -value and its uncertainty, *Ann Geophys*, **46**(6), 1271~1282.
- Mignan A, Woessner J, 2012, Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 1~45.
- Rodríguez-Pérez Q, Zúñiga F R, 2016, Báth's law and its relation to the tectonic environment: A case study for earthquakes in Mexico, *Tectonophysics*, **687**, 66~77.
- 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, *Ann Geophys*, **50**(3), 329~339.
- Shcherbakov R, Goda K, Ivanian A, et al, 2013, Aftershock statistics of major subduction earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **103**(6), 3222~3234.
- Shcherbakov R, Turcotte D L, 2004, A modified form of Báth's law, *Bull Seism Soc Am*, **94**(5), 1968~1975.
- Shcherbakov R, Turcotte D L, Rundle J B, 2005, Aftershock statistics, *Pure Appl Geophys*, **162**(6-7), 1051~1076.
- Shearer P M, 2012, Self-similar earthquake triggering, Báth's law, and foreshock/aftershock magnitudes: Simulations, theory, and results for southern California, *J Geophys Res*, **117**, 1~15.
- Tahir M, Grasso J R, Amorese D, 2012, The largest aftershock: How strong, how far away, how delayed? *Geophys Res Lett*, **39**, 1~5.
- Taylor J, 1997, Introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements, 45~110, Sausalito: University Science Books.
- Wang J H, Chen K C, Leu P L, et al, 2015, b -Values Observations in Taiwan: A Review, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, **26**(5), 475~492.
- Woessner J, Wiemer S, 2005, Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty, *Bull Seism Soc Am*, **95**(2), 684~698.
- Žalohar J, 2014, Explaining the physical origin of Báth's law, *Journal of Structural Geology*, **60**, 30~45.

Fast estimating of the largest aftershock's magnitude based on the Gutenberg-Richter law: a case study of the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake sequence

Xie Mengyu¹⁾ Meng Lingyuan²⁾ Shen Wenhao³⁾ Shi Baoping¹⁾

1) College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract Using the equation for magnitude of the inferred largest aftershock proposed by Shcherbakov and Turcotte(2004), we estimate the magnitude of the largest aftershock following the Jiuzhaigou earthquake from catalogues with different time intervals after the mainshock. The results show that the estimation trends to be a certain value when time intervals become larger and this value is consistent with the magnitude of the real largest aftershock. It should be emphasized that if the aftershock data are relatively complete, using the data in short time intervals after the mainshock(1 day or 2 days) can give an accurate estimation of magnitude of the largest aftershock of the Jiuzhaigou earthquake catalogue. In fact, estimations with different time intervals after the mainshock also indicate that using the aftershock data measured 12 hours (0.5 days) after mainshock can give a rational lower bound of magnitude of the largest aftershock. Moreover, we use two types of aftershock catalogues following the Jiuzhaigou earthquake with Richter magnitude (M_L) and surface-wave magnitude (M_s). And the corresponding results show that the two different catalogues give consistent results which indicates that magnitude of the inferred largest aftershock doesn't depend on types of magnitude chosen for catalogues. Therefore, the method we proposed can be generalized and applied to seismic hazard analysis in southwesten China. Current fitting method also implies that with the help of advance in earthquake detection and aftershocks identification, the method we proposed can accurately predict the magnitude of the largest aftershock in a short time after mainshock. In a word, although we can't predict precisely when and where the largest aftershock will occur, the method we proposed can provide rational magnitude estimation for the largest aftershock in a short period after the mainshock.

Key words: Magnitude of largest aftershock; Inferred largest aftershock; Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake; Gutenberg-Richter law; Magnitude of completeness