

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^{*}

付 虹, 邬成栋

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 通过对川滇地区 $M \geq 7$ 地震余震序列活动早期衰减特征的研究, 发现序列基本上符合 G-R 关系, 大、小地震成比例, 序列中的最大强余震小于或等于用序列拟合计算 b 值截距得到的最大地震, 且误差 $\Delta M \leq 0.4$ 。最大强余震多在 2 个月内发生, 序列中较强余震的 b 值小于 1 时, 其后通常还会发生震级较大的余震, 当 b 大于 1 时, 序列余震震级不会太高; 最大强余震常发生在序列前期释放较弱的地段。将这些共性特征应用于汶川 8.0 级地震余震的前期跟踪监视中, 通过了 2 个月内余震的衰减趋势和强余震判断结果的外推应用检验。

关键词: 川滇地区; 地震序列; 汶川 8.0 级地震; 震后趋势判断; 强余震

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)增刊-0430-06

0 前言

破坏性地震发生后, 对序列类型的判定和强余震的预测是地震预报的主要工作。针对序列判定, 很多学者进行了系统研究, 提出了很多研究方法, 如 b 值 (刘正荣等, 1986)、 K 值 (朱传镇, 1989) 等多项具有较明确物理意义的序列参数, 开展了关于序列衰减大森公式 P 值和古登堡关系 b 值的研究 (傅征祥, 1982; 陆远忠等, 1985), 对早期序列性质的综合判定研究也有所涉及 (陈立德等, 1992; 韩渭宾等, 1993; 周翠英等, 1996)。近期蒋海昆在更多统计样本的基础上, 研究给出了中强地震余震序列的很多统计特性 (中国地震局监测预报司, 2007), 对 $M \geq 5$ 地震震后趋势判定起到了很好的指

导作用。2008 年 5 月 12 日, 四川汶川发生 8.0 级地震, 笔者参加了现场的震情监视工作, 工作中应用前人的方法, 对 1970 年有小震记录以来川滇地区 $M \geq 7$ 地震序列的早期衰减特征进行研究, 发现了一些序列中与各自衰减特征结合得更紧密的共性特征, 并将其用于汶川 8.0 级地震序列的跟踪过程中。本文意在把这些有可操作性的经验作归纳总结, 为大地震后的趋势和强余震预测提供参考。

1 资料选取

1970 年以来川滇地区的 $M \geq 7$ 地震参数见表 1, 序列目录选自云南省地震局和四川省地震局地震台网记录、编辑供预报人员使用的目录 (内部资料)。

表 1 1970~1996 年川滇地区 $M \geq 7$ 地震参数表

发震时间	北纬	东经	震中	震级	最大强余震	距主震时间间隔 / d
1970-01-05	24°06′	102°36′	峨山	7.8	5.7	31
1973-02-06	31°18′	100°42′	炉霍	7.6	6.6	2
1974-05-11	28°12′	103°54′	大关	7.1	5.7	35
1976-05-29	24°24′	98°48′	龙陵	7.3	6.6	52
	24°36′	98°48′		7.4		
1976-08-16	32°36′	104°06′	松潘、平武间	7.2	5.1	30
1976-08-23	32°30′	104°18′		7.2		
1988-11-06	22°50′	99°43′	澜沧耿马	7.6	6.7	24
	23°23′	99°36′		7.2		
1995-07-12	21°59′	99°04′	孟连	7.3	5.1	7
1996-02-03	27°18′	100°13′	丽江	7.0	6.0	2

* 收稿日期: 2008-07-07.
基金项目: 云南省人才培引办 (2006PY01-39) 项目和国家科技支撑计划课题 (2006BAC01B03-02-01) 资助。
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从表 1 可见, 1970 年以来川滇地区 60% 以上的 $M \geq 7$ 地震的最大强余震发生在主震后 20 天。20 世纪四川地区有仪器记录以来, 1970 年以前发生的部分 7 级地震, 如: 1933 年茂汶汶溪 7.5 级地震的最大强余震是在主震后 52 天发生的; 1948 年理塘 7.3 级地震的最大强余震是在主震后第 52 天发生的。即川滇地区很多 7 级地震的最大强余震发生在主震 20 天后, 因此研究川滇地区 $M \geq 7$ 地震序列中强余震发生序列的时间、空间活动特征, 对最大强余震的预测是有帮助和有意义的。

汶川地震序列采用了四川地震台网给出的 $M \geq 4$ 地震定位后的目录。

2 地震序列趋势判断和最大强余震预测

2.1 地震类型判断

汶川 8.0 级地震序列取下限震级为 4.0 级地震计算得 $b=1.2$ 变化平稳, 表明序列本身衰减特征显示地震类型为主震—余震型的可能性较大; 统计自 1920 年有仪器记录以来, 中国大陆发生的所有 $M \geq 8$ 地震, 发现其地震类型都是主震—余震型, 可能是因为主震的震级太大、能量释放比较彻底, 因此再发生震级相当的地震的可能性小; 地震类型分布在空间上具有一定的稳定性, 如云南腾冲—耿马—澜沧地震带、马边地震带发生地震多为双震型和多震型地震, 思茅—普洱地震带发生地震以主震—余震型地震为主等, 据此认识有记载以来发生在龙门山北东向断裂上的历史地震都是主震—余震型的地震, 推测汶川 8.0 级地震

也是主震—余震型的可能性较大; USGS 给出的快速矩张量解的结果显示, 8.0 级主震破裂为逆冲断层作用, 兼有小量右旋走滑分量 (图 1), 中国地震局地球物理研究所网站上公布的《2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告》(陈运泰等, 2008) 也显示初期的破裂以逆冲作用为主, 据蒋海昆的统计结果, 中国大陆逆冲型地震中双震或多震型地震的概率是最小的, 仅为 13%。因此地震初期根据序列的衰减、中国大陆 8 级地震类型、地震破裂方式等, 把此次地震类型确定为主震—余震型。

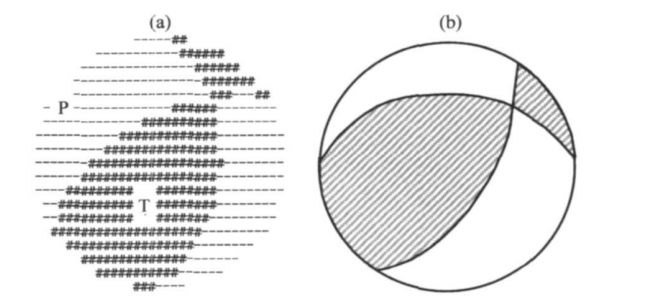


图 1 汶川 8.0 级地震矩张量解示意图
(A) USGS 的结果; (b) 陈运泰等 (2008) 的结果

2.2 最大强余震预测

序列最大强余震的计算方法很多, 在云南的 7 级地震序列跟踪过程中, 笔者认为最有效的方法是根据 G-R 关系 $\lg N = a - bM$ 用累计频度进行 b 值截距计算最大震级。云南地区 7 级以上地震的余震序列都较好地符合 G-R 统计关系, 1970 年以来 7 级以上地震的最大余震震级均等于或略小于序列 b 值截距得到的最大震级 (表 2、图 2)。

表 2 川滇地区 $M \geq 7$ 地震 b 值截距和最大强余震统计					
主震	b 值截距得到的最大余震震级	实际发生的最大余震震级	ΔM	地震类型	
1970-01-05 云南通海 7.8	6.1	5.7	0.4	主震—余震	
1974-05-11 云南大关 7.1	6.0	5.7	0.3	主震—余震	
1976-05-29 云南龙陵 7.3、7.4	6.6	6.6	0	双主震—余震	
1988-11-06 云南澜沧、耿马 7.6、7.2	6.7	6.7	0	双主震—余震	
1995-07-12 云南孟连 7.3	6.2	5.0 (前震最大 6.2)	1.2	主震—余震	
1996-02-03 云南丽江 7.0	6.1	6.0	0.1	主震—余震	
1973-02-06 四川炉霍 7.6	6.0	6.6	0.5	主震—余震	
1976-08-16~23 四川松潘 7.2、6.7、7.2	5.2	5.1	0.1	多震型	

从表 2 和图 2 可见, 1995 年的孟连 7.3 级地震序列 b 值截距得到的最大地震是 6.2 级, 而地震后的实际最大强余震只有 5.0 级, 两者相差较大,

但孟连 7.3 级地震有丰富的前震序列, 最大前震达到了 6.2 级, 如果把整个序列统一考虑, 序列也基本上符合 G-R 关系。1976 年松潘地震是多震型地

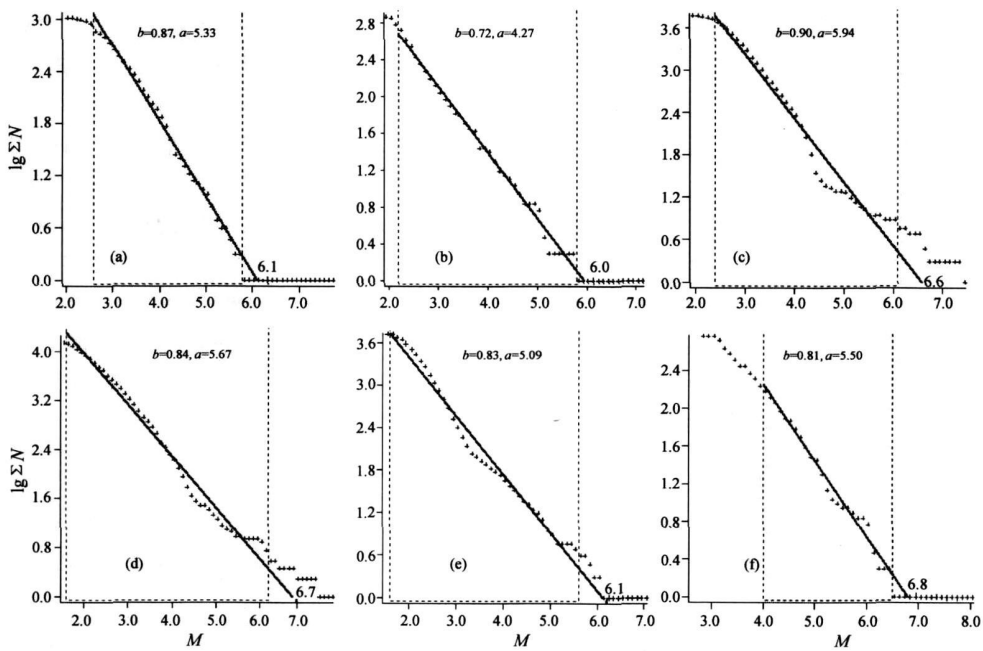


图 2 不同地震序列 b 值截距示意图

(a) 通海 7.8 级地震; (b) 大关 7.1 级地震; (c) 龙陵 7.3-7.4 级地震;
(d) 澜沧 7.6-7.2 级地震; (e) 丽江 7.0 级地震; (f) 汶川 8.0 级地震

震, 对于震群型的地震, b 值截距不能判断下次主震, 但对于全部主震已发生后的余震序列, 仍然是符合 $G-R$ 关系的。所有地震序列中计算结果和实际情况相差最大的是 1973 年炉霍地震, 分析原因, 一方面有可能是因为 1973 年四川西部的台网对小震的控制能力较低; 另一方面当时震级的误差也比较大, 四川台网给出的最大强余震是 6.6 级, 而在有些目录里给出的最大强余震只是 6.0 级, 所以如果使用这个震级也就不例外。即使炉霍地震是例外, 川滇地区的 $M \geq 7$ 地震序列衰减有 88% 是符合 $G-R$ 关系的, 用这个原则进行最大强余震预测, 概率也很高。

上述震例显示实际发生的最大强余震等于或略小于由序列 b 值截距得到的最大震级, 且一般情况下二者的震级差 $\Delta M \leq 0.4$ 。从大部分序列的动态跟踪计算, b 值截距计算得到的最大震级, 随着序列时间的延伸可能会有一点小的增加, 但从序列的第 3 天开始, 追踪到强余震发生前, 余震序列得到的 b 值截距变化量最大不超过 0.3 级。在现场计算汶川 8.0 级地震 b 值截距得到的最大震级为 6.8 级, 线性非常好, 根据上述认识, 分析认为汶川 8.0 级地震的最大强余震应小于等于 6.8 级, 6.5 级左右的可能性较大。

3 序列中显著事件的 h 值计算与余震活动趋势

刘正荣提出的 h 值, 一直以来被广泛用于地震序列类型的判断, 大多数应用都是计算整个序列的 h 值来判断地震类型。在长期的地震序列跟踪过程中, 笔者把 1970 年以来川滇地区 $M \geq 7$ 地震序列中震级相对大的地震事件作为子序列, 计算其 h 值, 发现 h 值对判定强余震的活动持续时间有一定的作用。

1970 年 1 月 5 日通海 7.8 级地震。整个序列无 6 级以上余震发生。取 $M_0 = 2.5$ 震后 2 个月内较强 5 级以上余震 h 值分别为: 1 月 9 日 5.1 级, $h = 0.3$; 1 月 14 日 5.0 级, $h = 0.58$; 1 月 27 日 5.0 级, h 值均偏小, 2 月 5 日 5.7 级最大强余震发生后, 其 h 值为 1.11。

1974 年 5 月 11 日大关 7.1 级地震后无 6 级以上余震发生。取 $M_0 = 2.5$ 计算震后 2 个月内较强 5 级以上余震 h 值可以看到, 6 月 5 日地震后 h 值偏小, 为 0.30; 6 月 15 日发生 5.7 级最大强余震, 其 $h = 1.2$ 。

1976 年 5 月 29 日龙陵 7.3-7.4 级地震后发生

6级以上余震 6次。取 $M_0=2.5$ 计算震后 2 个月内 6 级以上余震 h 值可以看到, 6 月 9 日 6.2 级, $h=0.53$ 7 月 4 日 6.0 级, $h=0.78$ 7 月 21 日 6.6 级最大强余震, $h=1.53$ 。

1988 年 11 月 6 日澜沧、耿马 7.6、7.2 级地震后发生 6 级以上余震 6 次。计算震后 2 个月内 6 级以上余震 h 值可以看到, 11 月 7 日 6.1 级, $h=0.3$ 11 月 15 日 6.1 级, $h=0.3$ 11 月 27 日 6.3 级 (以 12 小时为单位时间), $h=0.6$ 11 月 30 日 6.7 级最大强余震, $h=1.18$ 。

1995 年 7 月 12 日孟连 7.3 级地震后无 6 级以上余震发生。取 $M_0=3.0$ 计算, 7 月 19 日 5.0 级, $h=0.43$ 7 月 23 日 5.0 级, $h=0.4$ 7 月 31 日 5.0 级, $h=0.4$ 其后没有再发生 5 级以上地震。

1996 年 2 月 3 日丽江 7.0 级地震后发生 6 级以上余震 1 次。6.0 级地震发生在主震后第 3 天, 前面几天的 5 级地震也较密集。取 $M_0=2.5$ 计算震后 2 个月内较强 5 级以上余震 h 值可以看到, 2 月 7 日 5.4 级, $h=0.57$ 3 月 13 日 5.0 级, $h=0.57$ 其后直到 7 月 2 日和 9 月 25 日又分别发生了 5.5 和 5.8 级晚期余震。

1973 年 2 月 6 日炉霍 7.6 级地震后发生 6 级以上余震 2 次。取 $M_0=3.0$ 计算 2 月 8 日发生 6.6 级地震后, $h=0.43$ 3 月 24 日再次发生 6.0 级地震, $h=1.5$ 此后序列没有再次发生 6 级以上地震。

分析川滇地区 7 级以上地震序列中较强余震的 h 值, 可以看出, 当序列中较强余震的 h 值偏低时, 其后通常还会发生震级相当的余震。当序列中较强余震的 h 值较大时, 其后发生的余震通常震级不会太高。

2008 年 5 月 18 日汶川 8.0 级地震余震区发生

1 次 6.1 级地震, 到 5 月 21 日计算 $h=0.64$ 偏小, 笔者根据以往震例判断该序列再发生 6 级地震的可能性较大, 结合序列的最大余震仅 6.1 级, 与 h 值截距计算得到的最大震级相差较大, 5 月 21 日在现场的分析中认为最大强余震还没有发生。5 月 24 日 6.4 级地震发生后计算 $h=0.64$ 虽然 h 值仍然小于 1, 但 6.4 级地震和 h 值截距得到的 6.8 级的结果相差仅 0.4 级, 因此笔者不再坚持最大强余震没有发生, 只能认识到该序列的 6 级地震活动没有结束。

4 余震的空间分布特征

对川滇地区有序列以来的所有 $M \geq 7$ 地震的余震空间分布特征进行分析, 发现有很多地震的最大强余震都发生在前期有余震分布, 但余震震级相对偏小的区域。如 1976 年龙陵 7.3、7.4 级地震, 前 10 天的余震大部分都发生在距离主震不远的地方, 但北边也有零星的 4 级地震分布, 第 11 天在余震分布较弱的北段发生 1 次 6.2 级地震, 53 天后的 6.6 级最大强余震也发生在北段; 1988 年澜沧、耿马 7.6、7.2 级地震, 前 20 天的 6 级地震都发生在 7.2 级地震附近, 最大 6.1 级, 在第 21 天和第 24 天发生的 6.3、6.7 级强余震又回到南边 7.6 级地震附近; 1996 年丽江地震 7.0 级地震的 6.0 级最大强余震发生在主震的另一端; 1973 年 2 月 6 日炉霍 7.6 级地震, 前期 2 月 8 日的 6 级地震发生在主震附近, 到 3 月 24 日在主震的另一端再次发生 6.0 级地震。丽江、炉霍地震都属于单侧破裂的地震, 与汶川 8.0 级地震主要沿北东向破裂有一定的相似性 (图 3)。

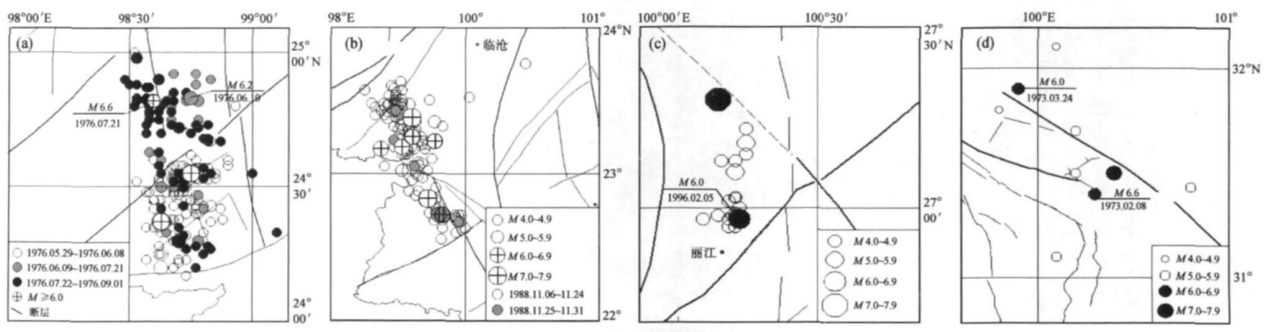


图 3 川滇地区部分 $M \geq 7$ 地震序列震中分布示意图

(a) 龙陵地震; (b) 澜沧、耿马地震; (c) 大关地震; (d) 丽江地震

汶川 8.0 级地震余震分布近 300 km 但 5 月 15 日以前发生的 6 级余震全部在余震区南段, 据笔者对川滇地区 7 级以上地震余震分布的研究结果, 认识到汶川 8.0 级地震余震区的中北段应该是未来最有可能发生 6 级地震的区域。5 月 18 日的 6.1 级和 25 日的 6.4 级地震就发生在余震区的北段 (图 4), 和川滇地区历史上 $M \geq 7$ 地震的序列分布特征有很多的相似性。

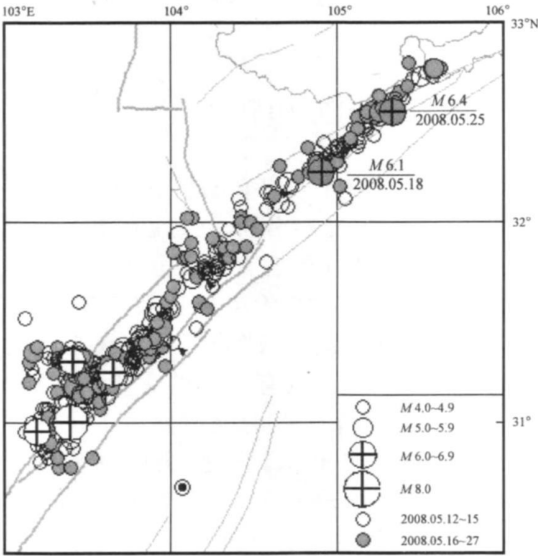


图 4 汶川 8.0 级地震序列震中分布示意图

5 结论和讨论

(1) h 值的提出主要是应用于整个地震序列类型的判断, 经过长期的地震序列跟踪研究和实践, 发现川滇地区所有 $M \geq 7$ 地震序列中, 把每个序列 2 个月内震级相对大的地震事件 ($M \geq 5$ 或 $M \geq 6$) 作为子序列看待, 每次地震后 h 值出现异常 ($h < 1$), 表明序列的中等地震集中活动时段还没有结束, 其后还有和这些主要余震事件震级相当的地震发生, 这个结果可以用 EST 模型 (庄建仓等, 2000) 给予解释。

(2) 川滇地区所有 $M \geq 7$ 地震序列, 无论是主震—余震型还是双主震—余震型的地震, 余震序列基本满足 G-R 关系, 最大强余震的震级小于等于由 h 值截距得到的最大震级, 大部分情况下两者的震级差 $\Delta M \leq 0.4$ 。应该注意的是前震和余震都是一个序列, 在考虑最大强余震时, 需把前震统一考虑。最典型的震例是 1995 年孟连 7.3 级地震,

h 值截距计算最大强余震为 6.3 级, 前震有个 6.2 级地震, 但 7.3 级地震后的最大余震仅 5.1 级。分析认为可能主震和多震型地震的应力、应变状况是由区域应力场决定的, 而余震的应力应变状况是由主震决定, 因此余震序列本身是相对独立的, 所以自身符合 G-R 关系。

(3) 最大强余震一般发生在前期余震分布震级相对低的地段, 即前期释放较弱的地段后期经常会发生相对强的余震; 单侧破裂的 $M \geq 7$ 地震, 主震的另一端基本上都有 6 级强余震发生; 这可能是余震区也存在能量释放相对平衡的原因, 这一认识可以为后期的强余震活动地点估计提供依据, 从而达到提高预报精度的目的。

(4) 在前述所有的统计分析中, 无论是主震—余震型还是双主震—余震型或多震型的地震, 其余震的衰减都有一些共性特征, 谷继成 (1979, 1982) 曾经用断裂力学和流变理论对余震序列的这些共性特征作了些理论解释。实际工作中正是这些既有序列各自的特点又可以用共性进行归纳的特征, 为余震序列的跟踪判断提供了可参考的值得信赖的依据。

(5) 通过汶川 8.0 级地震的现场震情跟踪工作和强余震的预测实践, 体会到目前的预测预报工作中最有效的仍然是已积累的经验 and 认识。在拓展新思路、新方法的同时, 也不能完全忘记已经取得的认识。重视已有的经验, 在继承的前提下再发展, 可能是中国地震预报最好的途径。

参考文献:

陈立德, 蔡静观, 孙志民, 等. 1992. 震后趋势早期判定的初步研究 [J]. 地震研究, 15 (4): 355—364.

陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告 [N/OL]. 中国地震信息网, 2008—05—18. (2008—05—18) [2008—07—15].

傅征祥. 1982. 强余震活动持续时间 [J]. 地震学报, 4 (4): 389—394.

谷继成, 谢小碧, 赵莉. 1979. 强余震的时间分布特征及其理论解释 [J]. 地球物理学报, 22 (1): 32—46.

谷继成, 谢小碧, 赵莉. 1982. 强余震的空间分布特征及其理论解释 [J]. 地震学报, 4 (4): 380—388.

韩渭宾, 王虹, 曾健, 等. 1993. 中强以上地震的震后趋势早期综合判定方法研究 [J]. 地震学报, 15 (1): 15—21.

刘正荣, 孔绍麟. 1986. 根据地震频度衰减与地震预报 [J]. 地震研究, 9 (1): 6—8.

陆远忠, 陈章立. 1985. 地震预报的地震学方法 [M]. 北京: 地震出版社.

中国地震局监测预报司. 2007. 中国大陆地震序列研究 [M]. 北京: 地震出版社.

周翠英, 张宇霞, 王红卫, 等. 1996. 以模式识别方法提取地震序列早期判断的综合指标 [J]. 地震学报, 18 (1): 118—124.

朱传镇, 王琳瑛. 1989. 震群信息熵异常与地震预报 [Q] // 许绍

婭编著. 地震预报方法实用化研究文集: 地震学专辑. 北京: 学术书刊出版社, 229—242.

庄建仓, 马丽. 2000. 主震和余震—从大森公式到 ETAS 模型 [J]. 国际地震动态, (5): 12—17.

The Wenchuan $M_{s}8.0$ Earthquake: Strong Aftershock Prediction Based on Attenuation Features of Aftershocks of $M \geq 7$ Earthquakes in Sichuan-Yunnan Region

FU Hong, WU Cheng-dong

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

We study the features of aftershock sequences of $M \geq 7$ earthquakes in the Sichuan-Yunnan region, and find the sequences basically conforms to the Gutenberg-Richter relation, and the number of large earthquakes is proportional with that of the small ones. The maximal magnitude of the aftershocks is less than or equal to the magnitude given by the b-value interception method using sequence data, and the magnitude error $\Delta M \leq 0.5$. The maximal aftershock usually happens in two months after a mainshock. When the b -value of relatively strong aftershocks in sequences is less than 1.0, the later aftershocks usually have equivalent magnitude; oppositely, when the b -value of relatively strong aftershocks in sequences is larger than 1.0, the magnitudes of later aftershocks are not too large. The maximal aftershock usually happens in the place where early energy release of sequence is weak. We apply these common characteristics to the aftershock monitoring of the Wenchuan earthquake, which passes the extrapolation tests of aftershocks attenuation tendency of the Wenchuan earthquake and its strong aftershock prediction.

Key words: Sichuan-Yunnan region; earthquake sequence; Wenchuan $M_{s}8.0$ earthquake; judgment for post-earthquake tendency