

用 b 值截距估算汶川 8.0 级地震序列最大余震^{*}

钱晓东, 秦嘉政

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用川滇地区主震—余震型地震序列资料进行统计, 结果表明: 对于主震—余震型地震序列, 在 $G-R$ 关系中用 b 值截距方法估算最大余震震级 M_m , 用线性较好的震级资料得到的结果与实际较为接近; 当主震震级 $M_s \geq 4.5$ 时, M_m 与最大震级 M_{max} 满足关系式 $M_{max} = -0.41 + 1.00M_m \pm 0.40$ 。根据历史地震资料和中国地震台网中心给出的汶川 8.0 级地震序列资料, 预测汶川地震序列属于主震—余震型, 估算的最大余震为 (6.4 ± 0.40) 级, 大于 7 级的可能性不大。

关键词: 汶川 8.0 级地震; b 值截距; 最大余震; 主震—余震型序列

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)增刊-0436-06

0 前言

2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震是四川地区有历史地震记录以来最强烈的地震。1976 年 8 月 16 日、23 日发生在四川松潘的两次 7.2 级地震是汶川地震前近 32 年来四川地区发生的 7.0 级以上强震。1900 年以来四川地区 7.5 级以上地震共发生过 3 次: 1933 年 8 月 25 日茂汶 7.5、1955 年 4 月 14 日康定 7.5 和 1973 年 2 月 06 日炉霍 7.6 级地震。距离此次汶川 8.0 级大震最近的强震是 1879 年 7 月甘肃武都南 8.0 级地震, 相距约 280 km。汶川 8.0 级大震发生后, 据中国地震台网中心给出的地震目录资料, 截至 2008 年 6 月 20 日, 在震区发生 5.0~6.9 级余震多达 33 次, 其中 6.0~6.9 级地震 5 次, 最大余震为 5 月 25 日 6.4 级地震。一次大震后如此多的高强度地震集中发生在一个较小的范围, 其危害是很大的。最大余震是否已经发生? 对强余震的有效预测就是一个十分重要和紧迫的工作。通过对中国西部 1900 年以来 8 级以上地震序列研究可知, 有 57% 的地震最大余震小于等于 6.5 级, 43% 的地震最大余震在 7.0~7.5 级之间, 强余震发生的时间覆盖主震当天至震后 9 个月的较长时间跨度, 这为正确判

断汶川 8.0 级地震序列最大余震带来了困难。

对余震序列危险性的预测, 近年来国内外专家、学者已作了大量有益的工作, 主要根据主震和余震的特点预测强余震可能发生的时间和地点, 但涉及到震级的并不多见。而大震发生后对其强余震进行定量化估计则是很重要的, 预报强余震的震级, 不仅可以减少国家和人民的损失, 而且能够增加我们对地震发展过程的认识。 b 值截距法是一种对强余震预测最直观、简单易行的方法, 吴开统等 (1989) 曾用此方法系统研究了中国大陆 50 多次地震序列的特征, 认为用 b 值截距法对正在发展过程中的地震序列进行最大余震震级预测, 实际检验其成功率较高。早在 1990 年, 国家地震局科技监测司 (1990) 就将 b 值截距法正式列入《地震学分析预报方法程式指南》, 认为该方法对预报最大余震的震级效果显著。由于地震序列存在地区差异, 不同地区地震序列表现特征不同, 而川滇地区又是强震多发地区, 其地震序列丰富而多样, 对这一地区地震序列用 b 值截距法系统进行强余震定量化研究, 寻求适合这一地区的强余震预报指标, 近年来还未见相关报道。本文中笔者系统地研究了川滇地区 100 多次主震—余震型地震序列的 b 值截距, 得到了适合该区的最大余震估算方法, 并对汶川 8.0 级地震序列的最大余震进行了估算。

* 收稿日期: 2008-07-07.

基金项目: 中国地震局“川滇重点强化地震跟踪专题”和云南省重点项目“云南强震活动与动力学研究”联合资助。

1 方法

古登堡和里克特 (1942 1954) 在研究世界地震活动时, 根据全球各大地震区 6 级以上地震数目的统计发现, 地震的震级与频度有以下关系:

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

上式亦称 G-R 关系式, 式中 a 和 b 两个参数可根据一定地区、一定时间的地震目录统计估算得到。参数 a 与一定区域的地震频度有关, 而参数 b 则反映了大、小地震的比例, N 为一定震级区间 ($M \pm 0.5$) 内的地震数 (频度), 近年来已有很多学者采用累积频度来代替 N (陆远忠等, 1985; 刘正荣, 2004), 即 N 为震级大于等于 M 的地震次数, 笔者采用累积频度作图法, 根据地震序列的累积地震频度—震级的 $\lg N-M$ 图作线性外推, 以直线在 M 轴上的截距来作为 b 值截距震级 M_{tb} 。

2 资料

对一次强震后地震序列的危险性进行预测, 不同研究者侧重方面各异: 有根据强余震前余震的空间分布特征来预测强余震地点的 (王碧泉等, 1983), 有根据地震序列频度衰减来预测地震序列是否属于前震序列的 (刘正荣, 1979), 还有根据地震序列的能量衰减来判断地震序列是否还有与主震震级相当的地震发生, 即对双震或震群的判断的 (钱晓东等, 2004) 等。本文侧重研究主震—余震型地震序列, 重点判断和估算主余震型地震序列的最大震级, 基于如下考虑: 首先, 主震—余震型地震序列占有比例较高, 在川滇地区, 此类地震序列所占比例高达 50%。其次, 一次大震或强震发生后, 对晚期强余震, 常常发生在人们以为地震危险期已经过去的时候, 危害很大。因此, 在本文中, 如果两次主要地震的震级差小于等于 0.6 则认为是双震型 (中国地震局, 1998), 我们就将整个地震序列分解为以双震为主震的两次地震序列, 如果最大地震与其它地震的震级差小于等于 0.5, 次数在 3 次以上则认为是震群, 同样将整个地震序列分解为以震群为主震

的多次地震序列, 共选择出川滇地区 $M \geq 4.5$ 以上地震序列 133 次, 图 1 给出了其空间分布。

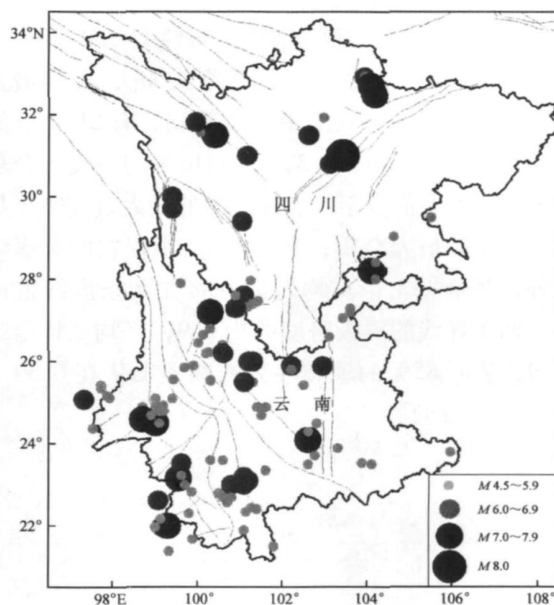


图 1 川滇地区地震序列空间分布

3 结果

3.1 川滇地区地震序列 b 值截距结果

对于本文使用的 133 次地震序列, 我们分别对每个地震序列进行统计, 即作震级—频度图来确定序列的控制震级, 统计时以 0.1 级震级分档, 根据频度最大值所对应震级就可以得到序列控制震级, 再用公式 (1), 采用最小二乘法对观测点进行线性拟合, 拟合直线与横坐标 M 的交点对应的震级即为 b 值截距。

从理论上讲, $G-R$ 曲线的最小二乘拟合值应该与实际观测值接近或相当, 但在地震序列的发展过程中我们发现, 在主震发生一段时间以后, 较小震级部分的观测值与 b 值线性拟合值符合较好, 而震级较大部分则一般会与拟合直线有一定偏离, 而主震则偏离直线更远, 即出现“野值”现象, 如果在做线性拟合的时候将这一“野值”包含进去, 则会造成拟合直线与大部分实际观测值出现较大偏离, 表现为直线的斜率明显变小, 直线受到单个点的影响较大, 从而使 b 值截距与实际最大震级偏差较大。因此本文在拟合过程中, 只考虑

线性比较好的震级段，特别是当主震与次大地震之间的震级差比较大时，拟合时不考虑主震到次大地震这些震级点。

图 2 给出每个地震序列的震级差 $\Delta M=M_n-M_{\max}$ 的时间分布，其中 b 值截距为 M_n ，实际最大余震震级为 M_{\max} 。从图中可以看到，有 21 个点的 $\Delta M\leq 0$ ，最小值为 -0.3 ，说明 16% 的主震—余震型地震序列 b 值截距比实际发生的最大余震略小甚至等于实际最大余震；有 20 个点出现在两条虚线之外，其余 113 个点均匀地分布在两条虚线范围内，两条虚线的震级跨度约为 0.9，平均 ΔM 值为 0.39，表明 85% 的地震序列震级差 ΔM 在 0.39 ~ 0.45 之间波动。

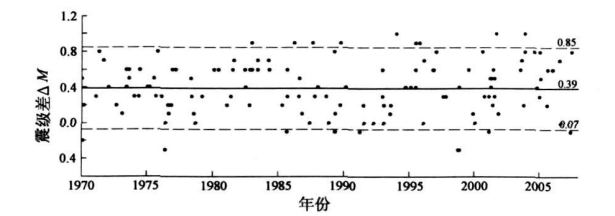


图 2 地震序列 b 值截距最大余震震级的震级差 ΔM 时间分布（虚线为平均值和 ± 1.5 倍均方差）

3.2 b 值截距与最大震级关系

对于 133 次序列的结果，我们绘制了不同主震震级时地震序列 b 值截距 M_n 与实际最大震级 M_{\max} 的关系（图 3），从图中可以看到，当主震震级在 $4.5\leq M_s\leq 6.4$ 范围时，数据点总数为 110 个，在两条误差直线之间的点多达 94 个，占 85%，线性拟合标准差为 0.29，1.5 倍标准差为 0.43，误差小于 0.5，直线拟合方程为

$$M_{\max}=-0.24+0.96M_n\pm0.43. \tag{2}$$

当主震震级 $M_s\geq 6.5$ 时，数据点总数为 23 个，在两条误差直线之间的点为 19 个，占 83%，线性拟合标准差为 0.34，1.5 倍标准差为 0.51，误差约为 0.5，直线拟合方程为

$$M_{\max}=-0.04+0.95M_n\pm0.51. \tag{3}$$

图 4 给出当主震震级 $M_s\geq 4.5$ 时所有地震序列的 b 值截距 M_n 与实际最大震级 M_{\max} 的关系，可以看到线性关系较好，数据点总数为 133 个，在两条误差直线之间的点多达 113 个，占 85%，线性拟合标准差为 0.27，1.5 倍标准差为 0.40，误差小于 0.5，直线拟合方程为

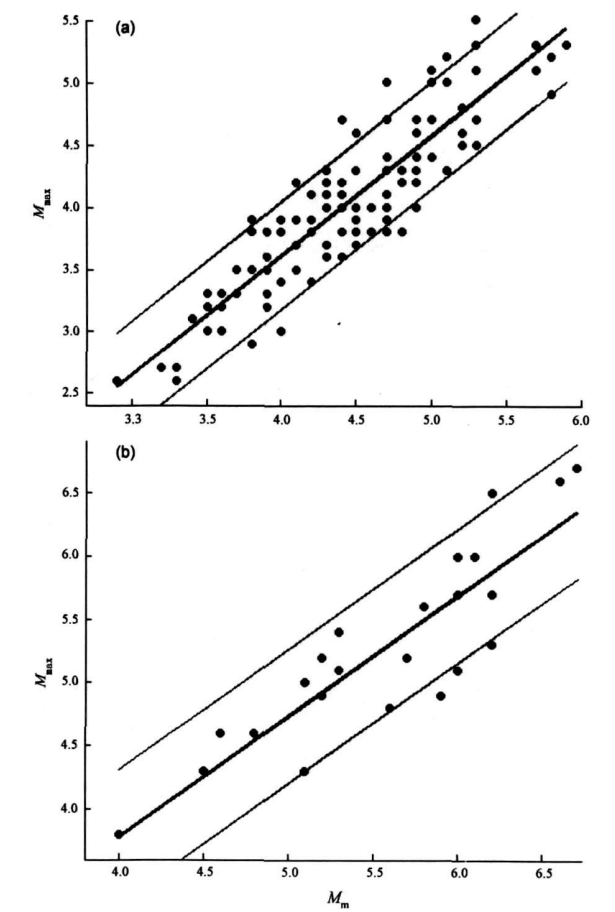


图 3 地震序列 b 值截距 M_n 与实际最大震级 M_{\max} 的关系
(a) 主震震级范围 $4.5\leq M_s\leq 6.4$ (b) 主震震级 $M_s\geq 6.5$
(中间实线为最小二乘拟合结果，外侧两条直线为拟合直线 ± 1.5 倍标准差)

条误差直线之间的点多达 113 个，占 85%，线性拟合标准差为 0.27，1.5 倍标准差为 0.40，误差小于 0.5，直线拟合方程为

$$M_{\max}=-0.41+1.00M_n\pm0.40. \tag{4}$$

图 5 给出当主震震级 $M_s\geq 4.5$ 时所有地震序列的主震震级 M 与实际最大震级 M_{\max} 的关系，可以明显地看到数据的离散度较大。数据点总数为 133 个，在两条误差直线之间的点占 86%，线性拟合标准差为 0.53，1.5 倍标准差为 0.79，误差约为 0.8，直线拟合方程为

$$M_{\max}=-0.72+0.87M\pm0.79. \tag{5}$$

可见，用主震震级直接来推断最大余震震级时存

在较大误差, 只能作为初略估算。

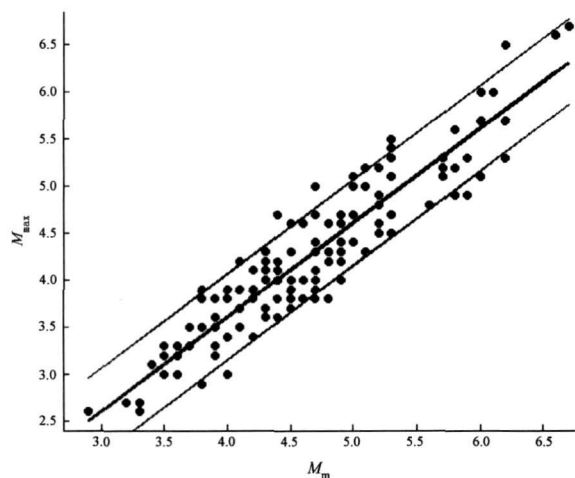


图 4 地震序列 b 值截距 M_m 与实际最大震级 M_{\max} 的关系 (主震震级 $M_s \geq 4.5$)

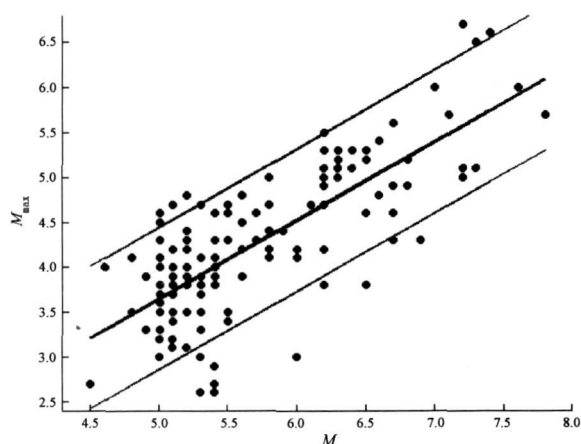


图 5 主震震级 M 与实际最大震级 M_{\max} 的关系 (主震震级 $M_s \geq 4.5$)

3.3 汶川 8.0 级地震序列最大震级估算

据历史地震目录资料, 1900 年至今中国大陆西部共发生 $M \geq 7.5$ 以上强震 19 次, 仅有一次为双震型 (地震序列主震与最大余震之差小于 0.6 级, 即 1951 年 11 月 18 日西藏当雄 8.0 级地震, 9 个月后 1952 年 8 月 18 日发生西藏当雄 7.5 级地震, 震级差为 0.5 级)。95% 的地震序列属于主震—余震型或孤立型地震, 因此我们判断本次汶川 8.0 级地震序列为主震—余震型的可能性很大。

据中国地震台网中心给出的汶川 8.0 级地震序列目录资料, 震级统一到标度为 M_s 。截至 2008 年 6 月 20 日, 记录到 4.0~4.9 级地震 177 次、5.0~

5.9 级地震 28 次、6.0~6.9 级地震 5 次, 最大余震为 5 月 25 日 6.4 级地震。通过震级—频度分布可知控制震级为 4.0 级, 图 6 给出地震序列的 G-R 关系拟合直线, 得到 $a=5.78$ $b=0.85$ b 值截距 $M_b=6.8$ 。首先, 作为初步估计利用公式 (5) 主震震级直接来推断最大余震震级, 得到误差较大的 $M_b=6.2$ 。其次, 根据公式 (3) 即主震震级在 $M_s \geq 6.5$ 范围时 b 值截距与最大震级的关系式, 得到最大震级 $M_{\max}=6.4$ 。最后, 再根据公式 (4) 即主震震级在 $M_s \geq 4.5$ 范围时的关系式, 得到误差较小最大震级 $M_{\max}=6.4$ 。可以看到, 利用中国地震台网中心给出的地震资料, 得到的汶川 8.0 级地震序列最大余震震级为 6.4 级, 考虑到误差为 0.40。我们认为汶川地震序列发生大于 7 级强余震的可能性不大。

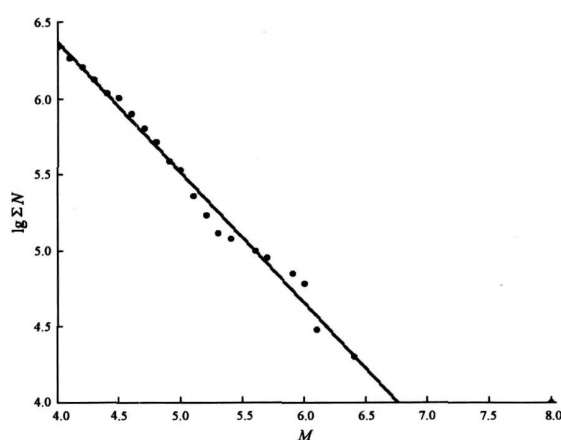


图 6 汶川 8.0 级地震序列 G-R 关系

4 讨论和结论

在地震预报中, 地震序列 b 值是最常用到的参数, b 值具有明确的物理意义和几何意义, 但是引起 b 值变化的机理和成因却是复杂的, 茂木清夫 (1962) 认为 b 值主要取决于材料的不均匀性; 肖尔茨 (1968) 认为 b 值与岩石所处的应力水平有关; 许昭永 (1990) 在材料压缩机上进行实验, 在不同压力及加压方式下, 对许多岩石破裂过程的声发射值 m (相当于 b 值) 作了观察分析, 发现声发射 m 值在加载初期较低, 在破裂应力 35~75% 时较平稳, 在岩石破裂前 m 值明显下降; 耿

乃光 (1986) 认为, b 值既取决于材料的性质又与介质所处的应力状态有关, 它是岩石破裂过程在多项因素作用下的一种反映。因此, 无论理论、模拟实验和实际观测资料都没能论证 b 值取决于单一因素, 其变化机理是复杂多样的。地震是岩石破裂的结果, 应充分利用破裂过程中 b 值所反映的信息。在地震序列中, 如果 b 值较大, 说明中小地震较多, b 值截距则会变得相对较小, 而如果 b 值较小, 说明较大余震发生的次数多, 相应地 b 值截距也会较大, b 值截距实际上是 b 值变化的反映, 但它又是属于与 b 值不同的预报因子, 由于引起岩石破裂的因素是复杂的, 因此我们应该重视在地震序列的发展过程中各个预报因子所发挥的作用。

在利用公式 (1) 对 a 、 b 值进行估算时, 要注意所用地震序列满足: (1) 要确定控制震级; (2) 地震数必须大于 15; (3) 作 G - R 关系式最小二乘拟合的数据点数必须大于 5 个点; (4) 最大震级与最小震级之差必须大于等于 1.5 级; (5) 震级要用统一标度, 我们统一采用 M_s 。

本文利用川滇地区主震—余震型地震序列资料进行统计, 结果表明:

(1) 对于主震—余震型地震序列, 在 G - R 关系中用 b 值截距方法估算最大余震震级, 用线性较好的震级段资料得到的结果与实际较为接近。

(2) 当主震震级 $M_s \geq 4.5$ 时, 主震—余震型地震序列的 b 值截距 M_b 与最大震级 M_{max} 满足关系式: $M_{max} = -0.41 + 1.00M_b \pm 0.40$ 。

(3) 根据历史地震资料和中国地震台网中心给出的汶川 8.0 级地震序列资料, 预测汶川地震序列属于主震—余震型序列, 估算的最大余震为 (6.4 ± 0.40) 级, 大于 7 级的可能性不大。

参考文献:

耿乃光. 1986. b 值模拟实验的进展和我国 b 值模拟实验的开端 [J]. 地震学报, 8 (3): 1—15.

国家地震局科技监测司. 1990. 地震学分析预报方法式指南 [M]. 北京: 地震出版社: 23—25.

刘正荣, 钱兆霞, 王维清. 1979. 前震的一个标志——地震频度的衰减 [J]. 地震研究, 2 (4): 1—9.

刘正荣. 2004. b 值特征研究 [G] //刘正荣. 地震预报方法. 北京: 地震出版社: 33—37.

陆远忠, 陈章立, 王碧泉, 等. 1985. 地震预报的地震学方法 [M]. 北京: 地震出版社: 94—102.

钱晓东, 秦嘉政. 2006. 云南地区余震序列的能量衰减 [J]. 地震, 26 (2): 113—122.

王碧泉, 王春珍. 1983. 余震序列的时空特征 [J]. 地震学报, 5 (4): 383—396.

吴开统, 张智, 焦远碧, 等. 1989. 用 b 值横距法预报强余震震级的方法研究 [G] //国家地震局科技监测司. 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: 183—193.

许昭永. 1990. 岩石破裂声发射 m 值和岩石力学性质 [J]. 地震研究, 19 (3): 291—297.

中国地震局. 1998. 地震现场工作大纲和技术指南 [M]. 北京: 地震出版社.

Gutenberg B, Richter C F. 1942. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration [J]. BSSA, 32: 163—191.

Gutenberg B, Richter C F. 1954. Seismicity of the earth and associated phenomena [D]. Princeton: Princeton University Press.

M Westerhaus, M W yss, R Yilmaz, et al. 2002. Correlating variations of b values and crustal deformations during the 1990s may have pinpointed the rupture initiation of the $M_w = 7.4$ Iran earthquake of 1999 August 17 [J]. Geophys J Int, 148: 139—152.

Mogi K. 1962. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena [J]. Bull Earthq Res Inst, 40: 320—341.

Scholz C H. 1968. The frequency-magnitude relation to microfracturing in rock and its relation to earthquake [J]. BSSA, 58: 399—415.

Using b -value Interception Method to Estimate Maximum Aftershock of the Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake

QIAN Xiao-dong QIN Jia-zheng

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

Abstract

We analyze the mainshock-aftershock type sequence in the Sichuan-Yunnan region, and estimate the magnitude of the maximum aftershock of every sequence using the method of b -value interception based on Gutenberg-Richter relation. The estimated results close the actual results when the magnitudes of the sequence have good linear relation. The b -value interception M_m and the maximum magnitude of aftershock M_{max} have the relation $M_{max} = -0.41 + 1.00M_m \pm 0.40$ when the magnitude of mainshock is equal to or more than 4.5. Based on historical earthquake sequences and the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake sequence data from China Seismological Network Center, we predict that the Wenchuan earthquake sequence is mainshock-aftershock type, and the magnitude of maximum aftershock is (6.4 ± 0.40) , i.e., the maximum aftershock is unlikely to exceed seven.

Key words: Wenchuan $M_s8.0$ earthquake; interception of b value; maximum aftershock; mainshock-aftershock type sequence