

全球 8 级地震序列特征研究^{*}

苏有锦^{1,2}, 赵小艳²

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026 2. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 研究地震序列的统计特征, 是进行震后地震趋势分析的基础工作之一。通过利用美国国家地震信息中心 (NEIC) 提供的全球地震目录资料, 对 1975 年以来全球 36 次 8 级地震序列进行了研究, 重点讨论了震后最大余震强度水平估计问题; 并按板内、板缘地震和震源机制类型进行了分类研究。结果表明, 不论是在强度 (最大余震水平) 上, 还是在频度 (5~6 级中强余震频度) 上, 板内地震与板缘地震存在显著差异: 板内地震的最大余震强度和 5~6 级中强余震活动频度均明显低于板缘地震的; 而按震源机制类型分类, 这种差异不显著。

关键词: 全球; 8 级地震序列; 统计特征; 汶川 8.0 级地震

中图分类号: P315.08 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)04-0308-09

0 引言

一次较大的地震发生后, 人们十分关心其后的地震趋势如何, 有无较大的余震或更大的地震发生? 要做出相应的趋势预测, 目前主要是基于对发震地区地质构造特征、历史地震活动性分析和地震序列特征统计分析两种主要方法。目前对中国大陆地区 $M \geq 5.0$ 地震序列特征已有较系统的研究 (吴开统等, 1990; 蒋海昆等, 2007), 并得出了 $M \geq 5.0$ 地震序列基本的统计特征, 为震后地震趋势的分析积累了大量地震序列震例资料, 奠定了研究基础。

2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 8.0 级地震, 造成惨重的人员伤亡和财产损失。大震后余震不断, 给抗震救灾工作带来了很大困难, 灾区人民和政府非常关注震后的余震监测和强余震预测问题。中国大陆地区历史上虽然发生过多次 8 级以上地震, 但有较完整仪器记录的震例还是非常有限的, 大多是 5 级、6 级和 7 级地震序列。为了对 8 级以上地震序列的统计特征有更进一步的了解和认识, 笔者用美国国家地震信息中心 (National Earthquake Information Center, NEIC) 目录资料, 研究了 1975 年以来全球 36 次 8 级以上地震序列, 重点讨论了最大余震强度水平估计问题, 并按板内、板缘地震和震源机制类型对 8 级以上地震序列

进行了分类研究。

1 资料

NEIC 提供了 1973 年以来的全球地震目录资料 (<http://neic.usgs.gov>)。本文中笔者用该目录资料, 检索到 1975~2007 年全球共发生 8 级以上地震 36 次 (组) (表 1)。由其分布图 (图 1) 可见, 中国大陆地区有 3 次 8 级地震, 分别是 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震 (在 NEIC 目录上为 8.0 级)、2001 年 11 月 14 日昆仑山 8.0 级地震和 2008 年 5 月 12 日四川 8.0 级地震。

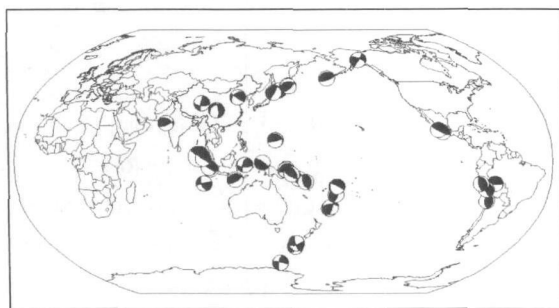


图 1 1975~2007 年全球 8 级以上地震分布及震源机制解图 (据 NEIC 目录资料)

每个地震序列目录资料的挑选按如下原则: 以主震发生后一个月内的余震活动区为挑选区域; 统一按 1 年时间长度选取; 震级 4.0 级以上。

* 收稿日期: 2008-07-14.

基金项目: 国家科技支撑计划项目“西南构造区强震预测预警技术和指标研究” (2006BAC01B03-04-01) 资助

表 1 本文所研究的 8 级以上地震序列参数及基本特征统计

序 号	时 间	震 级	不同时段最大余震 ^①					强余震频次 ^②			序列 <i>b</i> 值和截距 ^③		序 列 类 型	前 震 活 动 ^④	背 景 地 震 活 动 ^⑤	机 制 类 型 ^⑥	板 内/ 板 缘	参 考 地 名
			<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₃	<i>t</i> ₄	<i>t</i> ₅	<i>MAF</i> / ΔM	<i>N</i> ₅	<i>N</i> ₆	<i>b</i>	<i>BM</i>						
1	1975-05-26	8.1	5.6	4.7	4.9	4.9	5.6/2.5	1				主余		弱		板内		
2	1976-01-14	7.8								0.84		双震	前震序列	高				
3	1976-07-27	8.2	6.3	6.2	5.6	6.8	6.8/1.4	79	10		7.2	主余		弱	逆断	板缘	克马德克群岛	
4	1977-04-21	8.0	7.4	5.1	4.6	5.3	7.4/0.6	20	2			主余		高	走滑	板内	中国唐山	
5	1977-08-19	8.1	6.2	5.5	5.7	6.1	6.2/1.9	50	4	0.97	6.7	主余	前震序列	高	逆断	板缘	所罗门群岛	
6	1977-08-19	8.0	6.5	6.1	5.7	6.5	6.7/1.3	162	11	1.20	6.9	主余	前震	高	正断	板缘	苏门答腊	
7	1980-07-17	8.0	5.7	7.2	6.3	5.6	7.3/1.7	52	7	0.72	7.3	主余		高	逆断	板缘	圣克鲁斯群岛	
8	1985-09-19	8.1	7.6	5.3	4.8	5.6	7.6/0.5	11	2			主余		高	逆断	板缘	墨西哥	
9	1986-05-07	8.0	6.3	6.6	5.8	6.4	6.6/1.4	124	5	1.17	6.8	主余	前震序列	高	逆断	板缘	安德烈亚诺夫群岛	
10	1986-10-20	8.3	6.2	5.9	6.8	6.6	5.1	6.8/1.5	92	6	0.93	7.0	主余	高	走滑	板缘	克马德克群岛	
11	1989-05-23	8.2	6.0	5.5	5.2	6.4	5.7	6.4/1.8	28	2			主余	高	走滑	板缘	澳大利亚麦夸里群岛	
12	1993-08-08	8.2	5.7	6.2	5.5	5.8	5.5	6.2/2.0	30	2	1.04	6.4	主余	高	逆断	板缘	南马里亚纳群岛	
13	1994-06-09	8.2	6.1	6.0	4.3	5.6	5.4	6.1/2.1	7	2			主余	中	正断	板内	玻利维亚北部	
14	1994-10-04	8.3	6.2	6.2	6.2	5.6	6.9/1.4	203	18	1.09	7.1	主余		高	逆断	板缘	千岛群岛	
15	1995-04-07	8.1	6.1	5.5	5.6	6.0	6.1/2.0	18	4			主余		高	逆断	板缘	汤加群岛	
16	1995-07-30	8.0	6.2	6.4	4.9	5.7	6.6	6.6/1.4	36	5	0.79	7.0	主余	高	逆断	板缘	智利北部海岸	
17	1995-10-09	8.0	5.1	6.0	4.6	4.6	5.3	6.0/2.0	5	1			主余	中	逆断	板缘	墨西哥哈利斯科海岸	
18	1996-02-17	8.2	6.6	6.2	4.7	5.7	5.4	6.6/1.6	40	5	0.87	6.9	主余	中	逆断	板缘	印度尼西亚伊里安查亚地区	
19	1998-03-25	8.8	6.4	5.2	5.5	4.8	5.5	6.4/2.4	7	3	0.65	6.6	主余	弱	走滑	板内	马绍尔群岛	
20	1998-11-29	8.3	5.7	5.0	6.1	4.6	5.1	6.1/2.2	5	1	0.80	6.1	主余	中	走滑	板内	斯兰海	
21	2000-06-04	8.3	6.7	6.7	5.3	6.1	7.4/0.9	82	8	0.81	7.3	主余		高	走滑	板缘	印度尼西亚南苏门答腊	
22	2000-06-18	8.0	5.8	5.2	<4	4.7	4.3	5.8/2.2	3				主余	弱	走滑	板内	南印度海	

续表 1

序号	时间	震级	不同时段最大余震 ^①					强余震频次 ^②			序列 <i>b</i> 值和截距 ^③		序列类型	前震活动 ^④	背景地震活动 ^⑤	机制类型 ^⑥	板内/板缘	参考地名
			<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₃	<i>t</i> ₄	<i>t</i> ₅	<i>MAF/ΔM</i>	<i>N</i> ₅	<i>N</i> ₆	<i>b</i>	<i>BM</i>						
22	2000-11-16	8.2	6.8	6.7	6.7	6.6	6.1	6.8/1.4	204	17	0.94	7.4	震群		高	走滑	板缘	巴布亚新几内亚新爱尔兰岛
		7.8														逆断		
		8.2														逆断		
23	2001-01-26	8.0	5.9	5.3	5.4	4.9	4.8	5.9/2.1	9		1.11	6.0	主余		弱	逆断	板内	印度
24	2001-06-23	8.4	6.7	7.6	4.9	5.6	5.7	7.6/0.8	76	4	0.88	7.0	主余		高	逆断	板缘	秘鲁海岸
25	2001-11-14	8.0	5.6	5.9	5.3	4.5	5.1	5.9/2.1	13		1.00	6.2	主余		弱	走滑	板内	中国青海新疆交界
26	2002-11-03	8.5	6.0	5.2	5.2	5.1	5.5	6.0/2.5	24	1	1.14	6.2	主余	前震序列	弱	走滑	板内	阿拉斯加中部
27	2003-09-25	8.3	7.4	6.7	5.9	5.9	6.1	7.4/0.9	69	6	0.88	7.1	主余		高	逆断	板缘	日本北海道
28	2004-12-23	8.1	5.6	6.1	4.7	4.9	5.3	6.1/2.0	7	1	0.92	6.1	主余		弱	走滑	板缘	澳大利亚麦夸里岛北部
29	2004-12-26	9.0	7.5	6.4	6.3	6.8	7.5	7.5/1.5	581	31	1.27	7.1	主余		高	逆断	板缘	北苏门答腊
30	2005-03-28	8.7	6.1	6.3	6.4	6.9	6.8	6.9/1.8	185	11	1.08	7.1	主余		高	逆断	板缘	北苏门答腊
31	2006-05-03	8.0	6.0	6.0	5.8	5.6	6.1	6.1/1.9	61	3	1.23	6.4	主余		高	逆断	板缘	汤加
32	2006-11-15	8.3	6.0	5.7	5.7	6.0	5.8	6.0/2.3	168	3	1.38	6.4	主余		高	逆断	板缘	千岛群岛
33	2007-01-13	8.2	6.0	5.4	5.5	5.8	6.1	6.1/2.1	51	2	1.09	6.3	主余		中	正断	板缘	千岛群岛
34	2007-04-01	8.1	6.9	5.9	5.8	5.9	6.0	6.9/1.2	122	11	1.05	7.0	主余		高	逆断	板缘	所罗门群岛
35	2007-08-15	8.0	6.4	5.9	5.1	5.0	5.8	6.4/1.6	39	3	0.85	6.8	主余		高	逆断	板缘	秘鲁中部海岸
36	2007-09-12	8.5	7.2	6.9	6.0	6.9	7.3	7.3/1.2	152	16	0.75	6.8	双震		高	逆断	板缘	南苏门答腊
		8.1														逆断		

注：① 按 $t_1 \leq 3$ 天、3 天 $< t_2 \leq 15$ 天、15 天 $< t_3 \leq 30$ 天、30 天 $< t_4 \leq 90$ 天、90 天 $< t_5 \leq 365$ 天共 5 个统计时段给出每一个时段内的最大余震； $MAF/\Delta M$ 表示全序列的最大余震/主震 - 最大余震震级差。
② 对全序列统计给出了 $M \geq 5.0$ 余震频次 (N_5) 和 $M \geq 6.0$ 余震频次 (N_6)。
③ 计算给出了 G-R 关系 b 值，同时给出了 b 值截距方法估计的序列最大余震 BM 。
④ 指临震前数小时至 10 天左右的直接前震活动。
⑤ 指震源区及邻近地区长期背景地震活动水平，按弱、中、高 3 个等级分类。“弱”是指没有或只有零星 4 级地震活动；“中”是指有一定的 4~5 级地震活动或零星 6 级地震活动；“高”是指 5~6 级地震活动频繁，甚至 7 级地震活动也较频繁。
⑥ 指震源机制类型， P 轴俯角和 T 轴俯角均小于 45° 定义为走滑型； P 轴俯角大于 45° 定义为正断层型； T 轴俯角大于 45° 定义为逆断层型。

事实上，表 1 中 35、36 号两个地震序列目录资料不到 1 年时间长度。另外，2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊发生 9.0 级地震后，2005 年 3 月 28 日在其南部约 200 km 处又发生了一次 8.5 级地震，仔细查看两次地震的余震分布情况，它们基本上是两个独立的余震区，因此把它们作为两个地震序列。2006 年 11 月 15 日千岛群岛发生 8.3 级地震，大约 2 个月后的 2007 年 1 月 13 日，在距该地震约 100 km 处又发生了一次 8.2 级地震，从其余震分布上看它们基本上也是两个独立的余震区，因此也作为两个地震序列。

根据国内外学者对地震序列的分类（Mogi 1963；吴开统等，1990；刘蒲雄等，1996；蒋海昆等，2006），这 36 个 8 级以上地震序列中，有 2 个序列为双震型，有 1 个序列为震群型，其余均为主震—余震型或前震—主震—余震型。

36 个序列中，有 5 个序列（约占 14%）有明显的前震活动（表 1）。1976 年 1 月 14 日克马德克群岛 7.8、8.2 级地震前约 13 天（1 月 1 日），在距 8.2 级主震约 15 km 处发生了一次 6.9 级地震，其后一直到 14 日 7.8、8.2 级地震前共发生了 11 次 5.0~5.5 级余震，因此该 6.9 级地震序列可以认为是前震活动。1977 年 4 月 21 日所罗门群岛 8.1 级地震前约 5 小时，在距主震约 50 km 范围内连续发生了 6.8、7.6、7.5 三次强烈地震（6.8 级地震与 7.6 级地震时间间隔约 29 分钟），并发生了 12 次 5~6 级地震，直至 8.1 级地震发生。1977 年

8 月 19 日苏门答腊 8.0 级地震前约 1 小时，在距主震几千米的位置发生了 1 次 6.1 级地震，这应该是前震。1986 年 5 月 7 日安德烈亚诺夫群岛 8.0 级地震前约 2 小时，在距主震约 14 km 处发生了 5.0、6.1 级地震和多次 4~5 级余震活动。2002 年 11 月 3 日阿拉斯加中部 8.5 级地震前约 10 天（10 月 23 日）在距主震约 25 km 处发生了一次 6.7 级地震，并伴随有少量的余震活动。

2 序列最大余震分析

2.1 最大余震分布统计

根据上述 8 级以上序列目录资料，我们用两种统计方法进行了最大余震水平的统计分析。第一种方法是不考虑主震大小变化的影响，直接统计分析每一个序列在 1 年内的最大余震强度水平；第二种方法是按主震—最大余震震级差水平进行统计分析（表 1 中 $MAF/\Delta M$ 栏数据）。

图 2 给出了按板内、板缘地震分类（图 2 a）和按震源机制类型分类（图 2 b）统计出的序列最大余震强度分布。由图 2 a 可见，板内、板缘地震最大余震强度水平有较大差异，板内地震最大余震强度显著低于板缘地震。所研究的全部 36 个地震序列，最大余震平均为 (6.6 ± 0.6) 。板内地震有 8 个序列，最大余震平均为 (6.1 ± 0.5) ；板缘地震有 27 个序列，最大余震平均为 (6.7 ± 0.5) 。按震源机制类型分类，最大余震强度水平

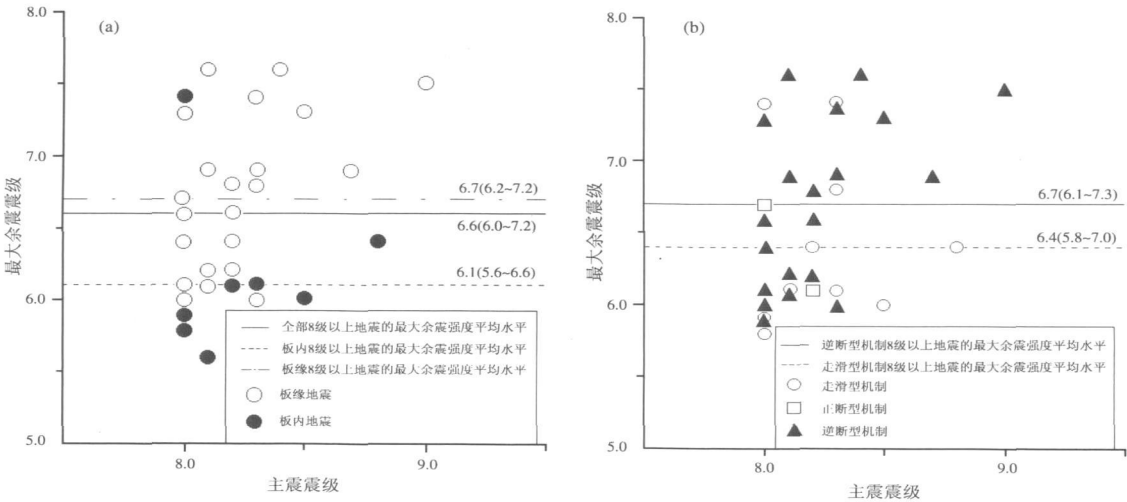


图 2 不同分类的最大余震强度分布统计

(a) 按板内、板缘地震分类；(b) 按震源机制类型分类

差异不显著 (图 2 b), 走滑型机制有 10 个序列, 最大余震平均为 (6.4 ± 0.6) 级; 逆断型机制有 22 个序列, 最大余震平均为 (6.7 ± 0.6) ; 正断型机制有 3 个序列, 样本太少, 未作统计分析 (在后面的相关分析中均未对其作分析)。因此, 图 3 仅给出了按板内、板缘地震分类的主震—最大余震震级差统计结果。由图 3 可见, 全部 36 个地震序列, 主震—最大余震震级差 ΔM 平均为 (1.6 ± 0.6) ; 板内地震主震—最大余震震级差 ΔM 平均为 (2.1 ± 0.6) ; 板缘地震主震—最大余震震级差 ΔM 平均为 (1.5 ± 0.5) 。板内地震主震—最大余震震级差 ΔM 明显高于板缘地震, 这与图 2 所得结果——板内地震最大余震强度显著低于板缘地震是完全一致的。

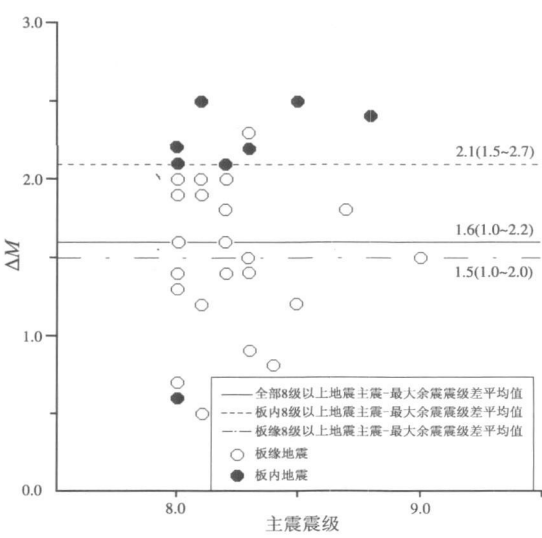


图 3 板内、板缘地震的主震—最大余震震级差分布统计

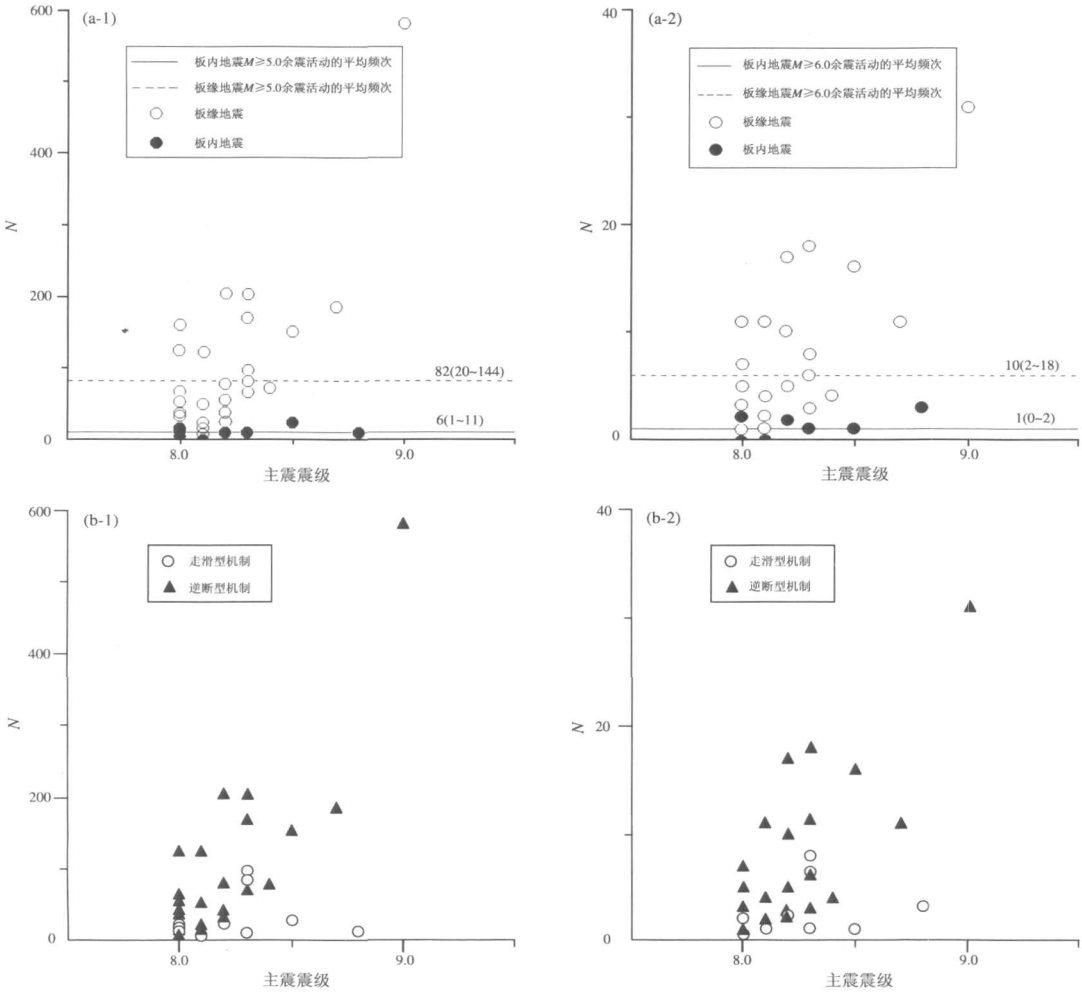


图 4 不同分类的 $M \geq 5.0$ 和 $M \geq 6.0$ 余震活动频次统计

(a) 按板内、板缘地震分类 (图 a-1 是 $M \geq 5.0$ 余震, 图 a-2 是 $M \geq 6.0$ 余震);
(b) 按震源机制类型分类 (图 b-1 是 $M \geq 5.0$ 余震, 图 b-2 是 $M \geq 6.0$ 余震)

虽然样本量有限，但上述 8 级地震序列最大余震强度的统计平均值相对稳定，数据离散度（方差）不大，因此用其进行震后趋势分析及最大余震强度水平快速估计是有参考价值的。即一个 8 级以上地震发生后，最大余震强度可直接按 (6.6 ± 0.6) 或主震—最大余震震级差 (1.6 ± 0.6) 做出快速估计，并进一步根据板内、板缘地震，震源机制类型分类做出适当修正。

图 4 还给出了不同分类的 $M \geq 5.0$ 和 $M \geq 6.0$ 余震活动频次统计结果。由图可见，按板内、板缘地震分类， $M \geq 5.0$ 和 $M \geq 6.0$ 余震活动频次均有较显著差异（图 4 a），即板内地震 5~6 级中强余震频度明显低于板缘地震。对板内 8 级以上地震， $M \geq 5.0$ 余震活动频次平均 (6 ± 5) 次， $M \geq 6.0$ 余震活动频次平均 (1 ± 1) 次；而对板缘 8 级以上地震， $M \geq 5.0$ 余震活动频次平均达 (82 ± 62) 次， $M \geq 6.0$ 余震活动频次平均达 (10 ± 8) 次。同样，按震源机制类型分类，这种差异不大（图 4 b）。这可能进一步表明，不论是在强度上（最大余震水平），还是在频度上（5~6 级中强余震频度），板内地震与板缘地震都存在较显著差

异：板内地震最大余震强度和 5~6 级中强余震活动频度均明显低于板缘地震，这可能与这两类地震较显著的构造环境和背景地震活动水平差异有关。该特征对震后趋势分析也是有意义的，可以据此对 5~6 级中强余震发生的可能次数做出一个基本估计。

图 5 给出了不同分类的最大余震发生时间分布统计。按 $t \leq 3$ 天、 $3 \text{ 天} < t \leq 15$ 天、 $15 \text{ 天} < t \leq 30$ 天、 $30 \text{ 天} < t \leq 90$ 天、 $90 \text{ 天} < t \leq 365$ 天共 5 个统计时段进行统计，分析最大余震发生时间的分布情况。按板内、板缘地震分类（图 5 a），板内地震最大余震优势发生时段在 t_1 时段内占 78%，在 t_2 时段内占到 89%；而板缘地震有 2 个优势时段 t_1 和 t_3 分别占 37% 和 30%。按震源机制分类（图 5 b），走滑型地震最大余震主要分布在 t_1 时段，占 40%，但后几个时段均有分布，总体上随时间减少；而逆断型地震也有 2 个优势时段 t_1 和 t_3 分别占 50% 和 23%。总的来看，对板内地震或走滑型机制地震，最大余震分布在 t_1 时段（3 天内）的可能性较大，而对板缘地震或逆断型机制地震，除了 t_1 时段（3 天内）， t_3 时段（3 个月后）的可能性也较大。

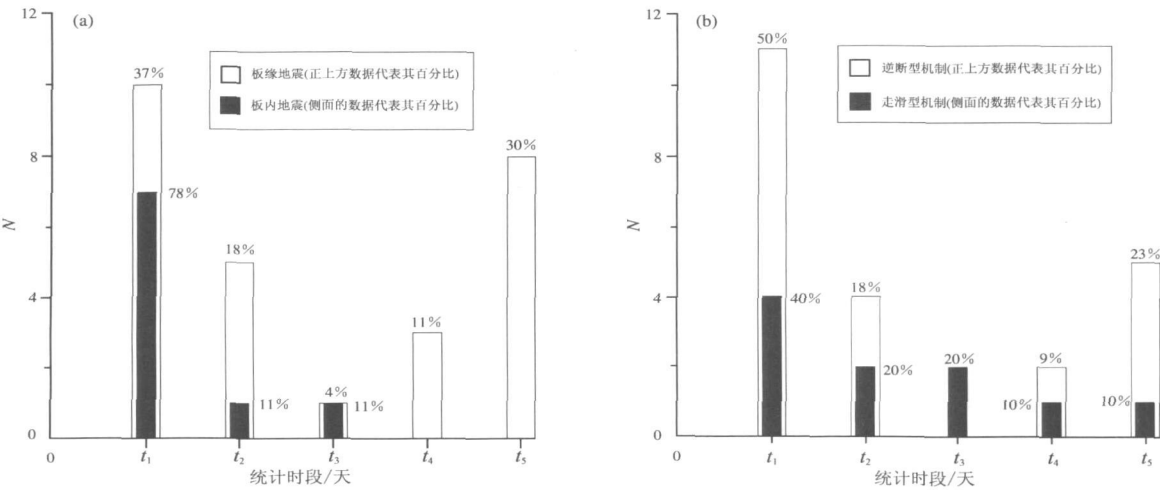


图 5 不同分类的最大余震发生时间分布统计
(a) 按板内、板缘地震分类；(b) 按震源机制类型分类

2.2 b值截距法估计最大余震强度

对余震活动较丰富，有足够样本量的地震序列，首先对每一个序列进行目录资料的完整性分析，然后用 G-R 关系式（ $\lg N = a - bM$ ）计算出每个地震序列的 b 值（表 1）。由表 1 可见，所有序列 b 值在 0.65~1.27 之间变化。

用 b 值截距法（G-R 关系拟合直线与横轴的交点）

（吴开统等，1990；蒋海昆等，2007）给出了序列最大余震强度估计（表 1 中 B_M 值）。图 6 给出了序列实际最大余震与 b 值截距法估计的最大余震之间的关系。用 Y 表示序列实际最大余震震级， X 表示 b 值截距法估计的最大余震震级，得到如下线性拟合关系：

$$Y = (1.07X - 0.60) \pm 0.08. \tag{1}$$

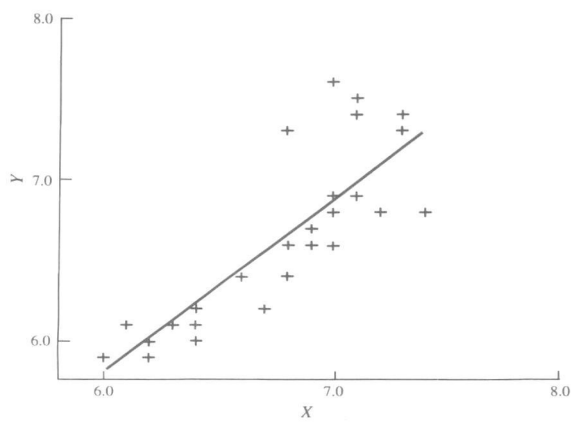


图 6 序列实际最大余震震级与 b 值截距方法估计的最大余震震级

图 7 是 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 9.0 级地震序列的例子，图中空心圈是按分震级档 ($\Delta M=0.1$) 给出的震级频度分布；实心圈是按某个震级以上累计给出的震级频度分布。用震级频度分布进行的 b 值拟合，完整性震级下限 $M_c=4.5$ ， b 值 $=1.27$ ，拟合相关系数 $R=0.99$ ， b 值截距 $BM=7.1$ ，则由 (1) 式估算得到最大余震为 6.9~7.1 级，而该次序列实际的最大余震是 7.5 级 (表 1)。

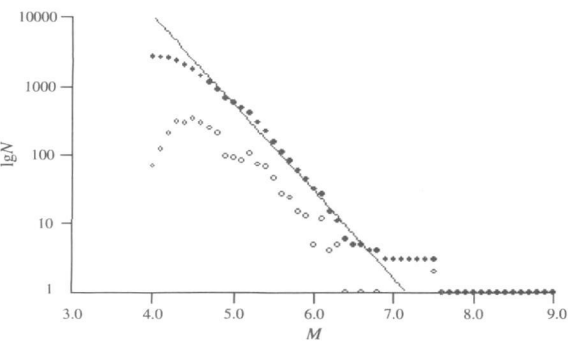


图 7 2004 年 12 月 26 日印尼 9.0 级地震序列的 b 值截距

由图 7 可见，拟合线上方的数据比下方的数据少，说明只有少数序列用该式得出的最大余震估计值比实际偏低，而多数序列用该式得出的最大余震估计值比实际要略偏高。它们之间这种较好线性关系的存在，表明用 b 值截距法估计序列最大余震是适当的，有一定的正确性。但用该方法需要一定的数据样本量 (一般是震后几天或更长时间，有足够的序列目录资料才适用)。

2.3 震区背景地震活动水平与余震活动水平

震区背景地震活动水平是指震源区及邻近地区长期背景地震活动水平，按弱、中、高 3 个等级分类：“弱”是指没有或有零星 4 级地震活动；“中”是指有一定的 4~5 级地震活动或零星 6 级地震活动；“高”是指 5~6 级地震活动频繁，甚至 7 级地震活动也较频繁。图 8 给出了震区背景地震活动水平属“弱”、“中”、“高”分类的几个例子。图 8^a 是 2001 年 1 月 26 日印度 8.0 级地震的情况，震源区及邻近地区长期背景地震活动水平属“弱”，8.0 级地震后，最大余震 5.9 级， $M \geq 5.0$ 余震 9 次，余震活动水平弱；图 8^b 是 1994 年 6 月 9 日玻利维亚北部 8.2 级地震的情况，震源区及邻近地区长期背景地震活动水平属“中”，8.2 级地震后，最大余震 6.1 级， $M \geq 5.0$ 余震 7 次， $M \geq 6.0$ 余震 2 次，余震活动水平也弱；图 8^c 是 2000 年 6 月 4 日苏门答腊南部 8.3 级地震的情况，震源区及邻近地区长期背景地震活动水平属“高”，8.3 级地震后，最大余震 7.4 级， $M \geq 5.0$ 余震 82 次， $M \geq 6.0$ 余震 8 次，余震活动水平高。

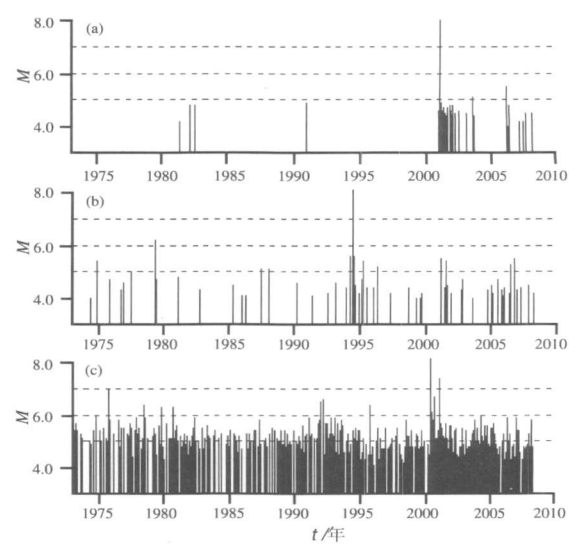


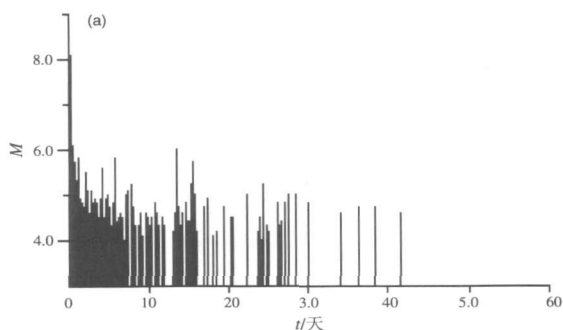
图 8 震区背景地震活动水平属“弱”、“中”、“高”的例子
(a) 2001 年 1 月 26 日印度 8.0 级地震，震区背景地震活动水平属“弱”；
(b) 1994 年 6 月 9 日玻利维亚北部 8.2 级地震，震区背景地震活动水平属“中”；
(c) 2000 年 6 月 4 日苏门答腊南部 8.3 级地震，震区背景地震活动水平属“高”

笔者对 36 个序列的长期背景地震活动水平进行了初步分析 (表 1)，发现震源区及邻近地区长

期背景地震活动水平对余震活动水平有较大影响。一般情况下, 背景地震活动水平高, 其主震发生后的余震活动水平 (最大余震强度、5~6 级中强余震频度) 相对要高; 反之, 背景地震活动水平低, 则余震活动水平也相对要低。

3 汶川 8.0 级地震序列最大余震分析

2008 年 5 月 12 日四川汶川发生了 8.0 级地震。根据 NEIC 目录, 至 6 月 22 日, 共记录到 $M \geq 4.0$ 地震 511 次, 其中 4.0~4.9 级 459 次, 5.0~5.9 级 50 次, 6.0 级以上 2 次 (6.0 级 1 次 (震后 13 天), 6.1 级 1 次 (震后当天发生)), 目前最大余震为 6.1 级。这是一次典型的单侧破裂型地震, 余震沿龙门山断裂带向 NE 方向扩展



了约 320 km。根据美国地质调查局 (USGS) 提供的震源机制解和震源破裂过程图像 (<http://earthquake.usgs.gov>), 这是一次逆断兼走滑型地震, 地震破裂最大位移约 9 m。

把上述 8 级以上地震序列的统计特征应用到汶川 8.0 级地震序列, 对其最大余震水平做出估计:

(1) 按一般 8 级地震序列最大余震强度平均水平估计, 其最大余震强度为 (6.6 ± 0.6) 级, 按一般 8 级序列主震—最大余震震级差平均 (1.6 ± 0.6) 来估计, 其最大余震强度为 (6.4 ± 0.6) 级;

(2) 该次地震为板内地震, 进一步按板内 8 级地震最大余震强度平均水平估计, 其最大余震强度为 (6.1 ± 0.5) 级;

(3) 按 b 值截距法估计 (图 9b), b 值截距是 6.3 用 (1) 式计算得最大余震为 (6.14 ± 0.08) 级。

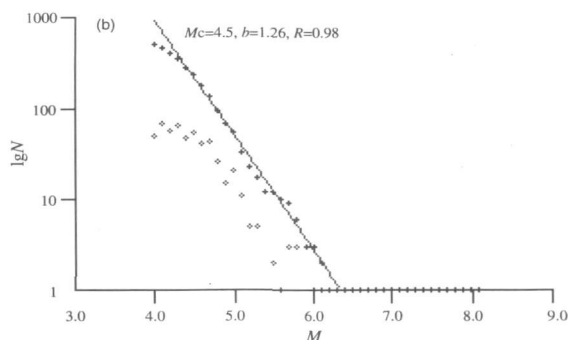


图 9 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震序列 M - t 图 (a) 和震级频度分布及 b 值截距 (b)

板内 8 级地震最大余震发生优势时段为 t 时段 (3 天内) (图 5a), 考虑到该次地震为逆断型地震, 也存在在 t 时段 (3 个月) 后发生最大余震的可能性。按上述震区背景活动水平分类, 龙门山带的背景地震活动水平属“中”等, 由此判断 8.0 级地震后余震活动水平不会太高。因此, 综合分析认为震后第一天发生的 6.1 级地震为该次地震最大余震的可能性很大, 也就是说汶川震区后续发生比 6.1 级地震更大余震的可能性不大。

这里说明一下, 如果用中国地震台网测定的结果, 该序列目前最大余震是 5 月 24 日发生的 (震后 13 天) 6.4 级地震。

4 结论

通过对 1975~2007 年全球 36 个 8 级以上地震序列的研究, 初步得到以下主要统计特征和认识:

(1) 最大余震强度 (震级) 水平估计

根据 1 年时间尺度内序列实际发生的最大余震统计得到, 序列最大余震强度平均水平为 (6.6 ± 0.6) 级; 按主震—最大余震震级差统计, 震级差平均为 (1.6 ± 0.6) 级。这是对 8 级以上地震序列最大余震活动情况的两种主要统计结果, 可用来对一次 8 级以上地震发生后的最大余震水平做出快速估计。

对板内、板缘地震分类统计的结果表明, 板内地震的最大余震水平明显低于板缘地震, 板内 8 级以上地震最大余震强度平均水平为 (6.1 ± 0.5) 级, 板缘 8 级以上地震最大余震强度平均水平为 (6.7 ± 0.5) 级; 而按震源机制类型分类统计, 这种差异不显著。

(2) 5~6 级强余震活动频次

统计表明, 板内地震与板缘地震的 5~6 级中强余震活动频度也存在较显著差异: 对板内 8 级以上地震, $M \geq 5.0$ 余震活动平均频次 (6 ± 5) 次, $M \geq 6.0$ 余震活动平均频次 (1 ± 1) 次; 而板缘 8

级以上地震, $M \geq 5.0$ 余震活动平均频次达 (82 ± 62) 次, $M \geq 6.0$ 余震活动平均频次达 (10 ± 8) 次。按震源机制类型分类统计, 这种差异不显著。该特征对震后趋势分析也是有意义的, 可以据此对 8 级地震后, 5~6 级中强余震发生的频次做出基本估计。

以上统计特征表明, 不论是在强度 (最大余震水平) 上, 还是在频度 (5~6 级中强余震频度) 上, 板内地震与板缘地震均存在显著差异: 板内地震最大余震强度和 5~6 级中强余震活动频度明显低于板缘地震, 这可能与这两类地震较显著的构造环境和背景地震活动水平差异有关。

(3) 最大余震发生优势时段

统计表明, 对板内地震或走滑型机制地震, 最大余震发生优势时段在 3 天内; 而对板缘地震或逆断型机制地震, 除了 3 天内为第 1 个优势时段外, 3 个月后还存在第 2 个优势时段。

(4) b 值截距法估计最大余震

b 值截距法估计的最大余震与实际发生的最大余震有较好的线性关系。这种线性关系的存在, 表明用 b 值截距法估计序列最大余震是适当的, 有一定的正确性。但多数情况下用该方法估计的最大余震比实际情况略偏高。

(5) 震区背景地震活动水平对余震活动水平的影响

震源区及邻近地区长期背景地震活动水平对

余震活动水平有较大影响。一般情况下, 背景地震活动水平高, 则主震发生后的余震活动水平 (最大余震强度、5~6 级中强余震频度) 就相对要高; 反之, 背景地震活动水平低, 则主震发生后的余震活动水平也相对要低。

这些统计结果虽然是从有限的样本震例 (36 个震例) 中统计得到的, 但还是具有一定的代表性, 对震后趋势分析和快速判定有一定的参考价值。随着震例的增多, 我们还会对统计结果进行进一步的修正。我们将其初步应用于 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震序列的最大余震水平估计, 认为震后第一天发生的 6.1 级地震可能是该序列最大余震。

参考文献:

- 蒋海昆, 傅征祥, 刘杰, 等. 2007. 中国大陆地震序列研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- 蒋海昆, 李永莉, 曲延军, 等. 2006. 中国大陆中强地震序列类型空间分布特征 [J]. 地震学报, 28 (4): 389—298.
- 刘蒲雄, 陈修启, 吕晓健, 等. 1996. 地震序列的后续显著地震的预测研究 [J]. 地震学报, 18 (1): 27—33.
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 1990. 地震序列概论 [M]. 北京: 北京大学出版社.
- Mogi K. 1963. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (3) [J]. Bull Earthquake Res Inst Univ Tokyo 41: 615—658.

Characteristics of Global Earthquake Sequences with $M_w \geq 8.0$

SU You-jin², ZHAO Xiao-yan²

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology, Hefei 230026, Anhui, China)

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

Abstract

Studying the statistic characteristics of earthquake sequences is one of the basic works to analyze postseismic earthquake development trend. BY use of NEIC catalogue, We analyze 36 earthquake sequences with $M_w \geq 8.0$ in the world since 1975, mainly discuss the estimation of the magnitude of maximal aftershock according to the classification by intraplate earthquake, interplate earthquake and the type of focal mechanism solutions. The results show that whether from intensity (the magnitude of maximal aftershock) or frequency (aftershocks with M_5-6), the statistic results are very different between intraplate earthquakes and interplate earthquakes. The magnitude of maximal aftershocks and the frequency of aftershocks with M_5-6 of intraplate earthquakes are significantly lower than those of interplate earthquakes, but this kind of difference is not obvious when the sequences are classified by the type of focal mechanism solutions.

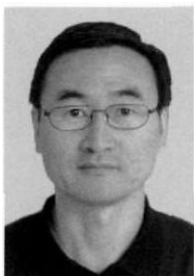
Key words: global earthquake sequences with $M_w \geq 8.0$, statistic characteristics, Wenchuan $M_8.0$ earthquake



刘杰 中国地震局台网中心研究员。1986年毕业于北京大学地球物理系，获学士学位；1989年毕业于北京大学地球物理系，获硕士学位；1998年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。目前从事地震预报和地震活动研究。



王海涛 新疆地震局研究员，中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地客座研究员。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1999年毕业于中国地震局地球物理研究所，获地震学专业博士学位。中国地震学会理事，新疆地震学会理事长。主要从事地震综合预报研究。



许建东 中国地震局地质研究所研究员。1983年毕业于北京大学地质系，获学士学位；1998年获美国纽约州立大学布法罗分校地质系博士学位。现为中国地震学会终身会员，美国地质学会（GSA）会员，联合国灾害评估与协调委员会（UNDAC）。目前的主要研究领域为火山地质、火山灾害、地震应急与救援。



刘耀炜 中国地震局地壳应力研究所研究员。1982年毕业于中国地质大学（武汉）地震地质专业。主要从事地下流体与强震前兆机理、地下流体观测技术与地震预测方法等研究。中国地震局科技委委员，中国地震局地下流体学科技术协调组组长，中国地震学会地震流体专业委员会主任。



苏有锦 云南省地震局研究员。1986年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1991年毕业于中国科学技术大学固体地球物理专业，获硕士学位。主要从事地震学和地震预测预报研究。



吴小平 云南大学资源环境与地球科学学院教授。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1988年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系，获硕士学位；2000年毕业于中国科学院云南天文台，获博士学位。主要从事地震学、岩石力学、重力学与固体潮、地球动力学的教学与科研工作。



崔庆谷 云南省地震局高级工程师，2002年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。主要从事地震及前兆观测技术研究工作。



周青云 中国地震局地震预测研究所读硕士研究生。2008年毕业于北京大学地球物理专业，获学士学位。主要从事震源过程、地震定位及地震活动性分析研究。

注：皇甫岗、秦嘉政、付虹、钱晓东、张建国、崔建文、毛先进、杨润海、毛玉平等人的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol30 No3, Vol28 No4, Vol30 No1, Vol29 No1, Vol29 supp, Vol29 No4, Vol31 No2, Vol29 No4, Vol30 No3.