

薛艳、刘杰、刘双庆, 2018, 全球浅源巨大地震序列统计特征, 中国地震, 34(4), 676~694.

全球浅源巨大地震序列统计特征

薛艳¹⁾ 刘杰¹⁾ 刘双庆²⁾

1) 中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 天津市地震局, 天津 300201

摘要 系统研究了 1976 年以来全球 58 次 $M_w \geq 7.8$ 浅源地震序列的统计特征。结果显示: ①在 58 次巨大地震中, 板间地震 45 次, 板内地震 13 次, 板内地震强度低于板间地震。②74.1% 的板间地震为逆断层错动, 61.5% 的板内地震为走滑型错动。③58 次地震序列中, 82.8% 为主-余型, 17.2% 为多震型; 与 5 级以上地震序列不同, 巨大地震没有孤立型, 其余震比较活跃; 板内地震中, 多震型占 7.7%, 而板间地震中多震型占 20%。④对于主-余型序列, 75% 的主震与最大余震的震级差为 1.0~2.0 级; 震级差与主震震源错动类型有关, 走滑型的震级差明显大于逆冲型; 68% 的最大余震发生在主震后 3 天内, 其次为 10 天左右与 1 个月左右; 49% 的 $D_{\max-\text{aft}}$ (最大余震震中与主震震中之间的距离) 不超过余震区长轴的 1/3, 31% 的 $D_{\max-\text{aft}}$ 为余震区尺度的 1/3~1/2; 最大余震的发生时间、最大余震震中与主震震中之间的距离同主震断层错动类型间的关系不明显。⑤应用 ETAS 模型计算了 46 个序列参数后发现, b 值、 p 值和 a 值均呈 Beta 分布, b 值平均为 1.164 ± 0.211 , p 值平均为 1.559 ± 0.412 , a 值平均为 1.673 ± 0.911 ; p 值和 a 值分布分散; 对于不同的序列类型、震源错动类型及板内、板间地震, b 值差异不显著; 逆冲型序列 p 值明显大于走滑型和正断层型; 板间地震序列 a 值明显小于板内地震; 逆冲型序列 a 值明显小于走滑型和正断层型; 这表明, 与板内地震相比, 板间地震具有较强的“余震激发余震”的能力; 逆冲型破裂虽然会导致序列衰减较快, 但触发次级余震的能力相对较强。⑥逆冲型巨大地震余震区长轴 L 的对数与主震震级 M_w 间的拟合关系式为 $\lg L = (-1.399 \pm 0.306) + (0.470 \pm 0.037) M_w$ 。

关键词: 浅源巨大地震 序列类型 主-余型 多震型 孤立型 板内地震 板间地震

[文章编号] 1001-4683(2018)04-0676-19 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

近年来全球发生的多次 8 级以上巨大地震造成了严重的人员伤亡和财产损失。大震后短时间内余震活动频繁, 极易引起重大次生灾害。因此, 大地震余震活动研究、序列类型判定和强余震预测在抗震救灾、区域地震危险性评估等方面具有非常重要的意义(蒋海昆等, 2007a)。

由于全球布设较为完善的地震台网时间不长, 且大地震的复发周期较长, 因此, 有完整小震记录以来 8 级地震震例较少。人们对地震序列的研究主要集中在 5 级以上地震(蒋海

[收稿日期] 2018-02-05; [修定日期] 2018-03-13

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH17048、XH17003Y)共同资助

[作者简介] 薛艳, 女, 1969 年生, 高级工程师, 主要从事地震预测研究。E-mail: xueyan5619@seis.ac.cn

昆等,2007a、2007b;吴开统等,1990;Wells et al,1994;Chen et al,2013、2016)。近年来,学者们对全球大震序列进行了一定的研究。吕晓健等(2010)研究了全球大陆地区 29 次 7.0~7.9 级浅源地震中走滑型与非走滑型地震的强余震震级分布特征和时间分布特征。苏有锦等(2008)按照板内、板间地震及震源机制解类型研究了 1975~2007 年全球 8 级以上地震序列最大余震的震级分布特征,以及 5、6 级余震频度与最大余震发生时间的特征,讨论了震区背景地震活动水平与余震活动水平间的关系。苏有锦等(2014)研究了 1975~2010 年全球 7 级以上地震序列,内容包括序列分类、余震频度、最大余震、余震区线性度与背景地震活动、最大余震间的关系等。人们通常将 8 级以上地震称为巨大地震。Mogi(1974)将 7.8 级以上地震也作为巨大地震,研究了全球 7.8 级以上板间巨大地震的时空分布特征。梅世蓉等(1996)研究了我国大陆及邻区 7.8 级以上巨大地震前后地震活动图像特征。

余震序列参数可以反映序列的衰减特征和激发余震的能力,不同的构造区域、序列类型、主震震源机制解类型、震源区局部构造应力水平和大地热流等地球物理特征都可以表现为序列参数的显著差异(Kagan et al,2010)。对余震序列参数特别是早期参数特征(蒋海昆等,2007a)的研究一直是地震学和地球物理学研究的热点问题。学者们应用“传染型余震序列(epidemic-type aftershock sequence,简称为 ETAS)”模型研究了不同区域地震序列参数,得到了一些有意义的结果(Guo et al,1997;Ogata,1998;庄建仓等,2000)。蒋海昆等(2007c)应用 ETAS 模型系统研究了我国大陆地区中强以上地震序列早期参数的平均统计特征,讨论了 b 值、 p 值、 a 值随不同的区域、主震断层类型、序列类型的变化。蒋长胜等(2014)研究了 2008 年以来新疆于田地区 3 次强震序列的早期参数特征。

本文将系统研究 1976~2016 年全球 $M_w \geq 7.8$ 浅源(震源深度小于 70km)地震序列的统计特征,内容包括地震序列类型划分、序列类型与主震震源破裂方式间关系、最大余震与主震的时间间隔及震级差、余震区规模与主震震级间关系等,并应用 ETAS 模型计算序列参数。

1 地震目录完备震级讨论与地震序列的挑选原则

本文使用美国国家地震信息中心(NEIC)提供的全球地震目录(<http://earthquake.usgs.gov>)研究地震序列,震源机制解数据来源于美国哈佛大学(<http://www.globalcmt.org/CMT-search.html>)。美国国家地震信息中心(NEIC)1973 年以来的全球地震目录使用了多个震级标度,其中,4~5 级地震多为 m_b 震级,6 级以上主要为 M_w 、 M_s 震级,而对于 7.8 级以上地震,主要为 M_w 震级。本文对该目录所有地震震级统一采用 M 表示。

利用“最大曲率(MAXC)及拟合度分别为 90%、95%的 GFT”方法(Wiemer et al,2002)计算 1973~2017 年全球地震目录的最小完备性震级,其中,95%GFT 方法给出的结果优于 90%GFT,同时这 2 个方法的结果又优于最大曲率方法。依据择优原则,给出最佳最小完备震级 M_c -best(图 1)。由图 1 可见,1973~1994 年最小完备震级为 4.6~5.0 级;1995~2012 年为 4.3~4.7 级;2013~2016 年为 4.2~4.6 级。

挑选地震序列的原则:以主震后 1 个月内形成的余震密集区为挑选区域,挑选主震后 3 个月内的地震资料,震级下限为 $M4.0$ 。值得注意的是,2004 年 12 月 26 日苏门答腊 9.1 级地震后 3 个月(即 2005 年 3 月 28 日)又发生 8.6 级地震,这 2 次地震的余震区不重合,所以将其作为 2 个独立的地震序列;2006 年 11 月 15 日千岛群岛 8.3 级地震后 2 个多月(即 2007 年

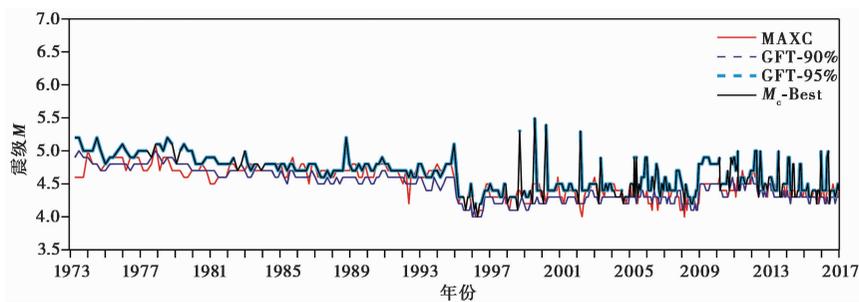


图 1 多种方法计算全球最小完备性震级随时间的变化曲线

1月13日)在其震中附近又发生8.1级地震,这2次地震震中相距约100km,余震区大致重合,故将其作为1个序列进行处理;1987年11月30日阿拉斯加7.9级地震后3个月(即1988年3月6日),在其震中南部约196km处又发生7.8级地震,2次地震的余震区不重合,故作为2个独立的地震序列(附表1)。

按照以上原则,共挑选出全球58个独立的 $M_w \geq 7.8$ 浅源地震序列,其中,8级地震序列26个,9级地震序列2个。我国大陆及邻区共发生 $M_w \geq 7.8$ 地震3次,分别为2001年11月14日昆仑山口西7.8级、2008年5月12日汶川7.9级、2015年4月25日尼泊尔7.8级地震。这些地震主要分布在环太平洋地震带与欧亚地震带(图2)。

2 地震序列类型的统计特征

考虑到序列类型早期判定的需要,本文依据主震与3个月内最大余震之间的震级差 ΔM 进行序列类型划分,划分标准如下(蒋海昆等,2006):

- (1) 孤立型: $\Delta M \geq 2.5$,且余震次数较少;
- (2) 主-余型: $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$;
- (3) 多震型: $\Delta M < 0.6$,多震型包含了双震型和震群型。

依据该划分标准对58次地震序列进行类型判定,并按走滑型(S)、正断层型(N)和逆断层型(T)等3种典型震源机制解进行分类。这里按震源机制解中P轴、T轴倾角 P_{plug} 、 T_{plug} 进行简单分类,当 $P_{\text{plug}} \leq 45^\circ$ 、 $T_{\text{plug}} \leq 45^\circ$ 时,为走滑型机制;当 $P_{\text{plug}} > 45^\circ$ 时,为正断层型机制;当 $T_{\text{plug}} > 45^\circ$ 时,为逆断层型机制(苏有锦等,2014)。

此外,采用Kanamori等(1975)的分类方法,把发生在板块边界附近,但其发震断层面不是沿着板块边界的地震划分为板内地震。本文研究的是浅源地震,所以将余震区长轴方向作为地震的发震断层分布方向。

2.1 地震序列类型与主震破裂方式

附表1给出了58次巨大地震的基本参数,包括发震时间、空间位置、震级、震源深度、震源机制解、余震区长度、最大余震、序列类型等。在58次地震中,板内地震13次,占总数的22.4%;其余77.6%为板间地震(图2)。

从主震断层的错动方式来看(图3,附表1),板间地震中74.1%为逆断层,22.4%为走滑型。而对于板内地震,61.5%为走滑型。即板间地震主要为逆断层型,而板内地震主要为走滑型。全球61.5%的走滑型巨大地震发生在板内。

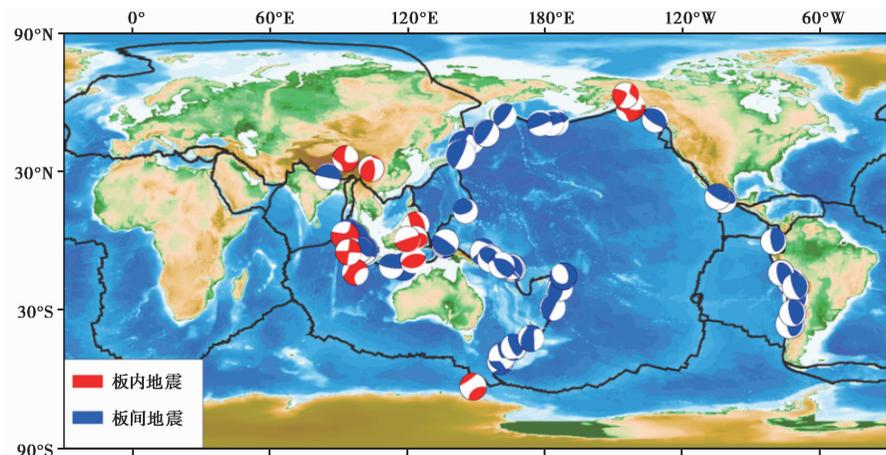


图 2 全球 $M \geq 7.8$ 浅源地震震源机制解示意图

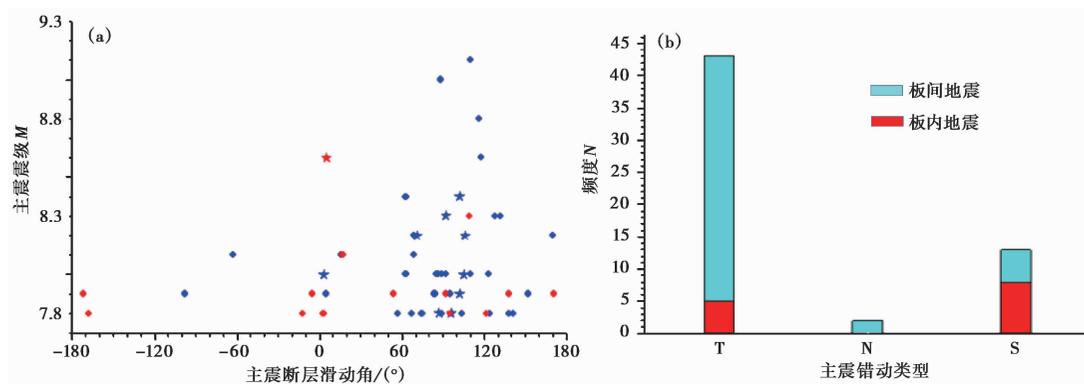


图 3 巨大地震震源错动类型统计

(a) 主震震级与滑动角, 其中红色表示板内地震, 蓝色表示板间地震, 圆点表示主-余型, 五角星表示多震型;
 (b) 不同主震错动类型统计, 柱状图中红色部分为板内地震, 浅蓝色部分为板间地震; T 表示逆断层、N 表示正断层、S 表示走滑型

在 58 次巨大地震中, 主-余型 48 次, 占总数的 82.8%, 其余 17.2% 为多震型。与 5 级以上地震不同, 巨大地震没有孤立型, 表明其余震比较活跃。在 10 次多震型地震中, 8 次为逆断层型, 2 次为走滑型(图 3(a))。在 10 次多震型地震中, 仅有 1 次为板内地震。板内地震中多震型仅占总数的 7.7%, 而 20% 的板间地震为多震型。

2.2 最大余震与主震的震级差、时间差和震中距离统计

统计所有主-余型地震的主震与最大余震震级差(简称震级差, 用 ΔM 表示), 结果显示(图 4(a)), 震级差与主震震级间没有统计关系, 对于 7.8~7.9 级地震, 震级差为 0.6~2.4 级, 而 8 级以上地震, 震级差为 0.6~2.0 级。对 ΔM 进行分段统计, 结果显示(图 4(b)), ΔM 主要为 1.6~2.0 级、1.0~1.5 级与 0.6~0.9 级, 分别占总数的 42%、33%、18%, 即 75% 的主-余型地震 ΔM 为 1.0~2.0 级。

此外, 震级差 ΔM 与主震震源断层错动类型有关, 走滑型序列的震级差明显大于逆断层型(图 4(c))。在 48 次主-余型地震序列中, 主震为逆断层型的有 35 次, 走滑型 11 次, 正断

层型 2 次。分别统计逆断层型和走滑型地震序列的震级差(图 5),结果显示,对于逆断层型序列,震级差为 0.6~2.0 级(图 5(a)),其中,40%的震级差为 1.6~2.0 级,34%为 1.0~1.5 级,26%为 0.6~0.9 级(图 5(b))。而走滑型序列,震级差为 1.0~2.5 级(图 5(c)),其中,45%的震级差为 1.6~2.0 级,36%为 2.1~2.5 级,18%为 1.0~1.5 级(图 5(d))。可见,走滑型序列的震级差明显大于逆断层型。

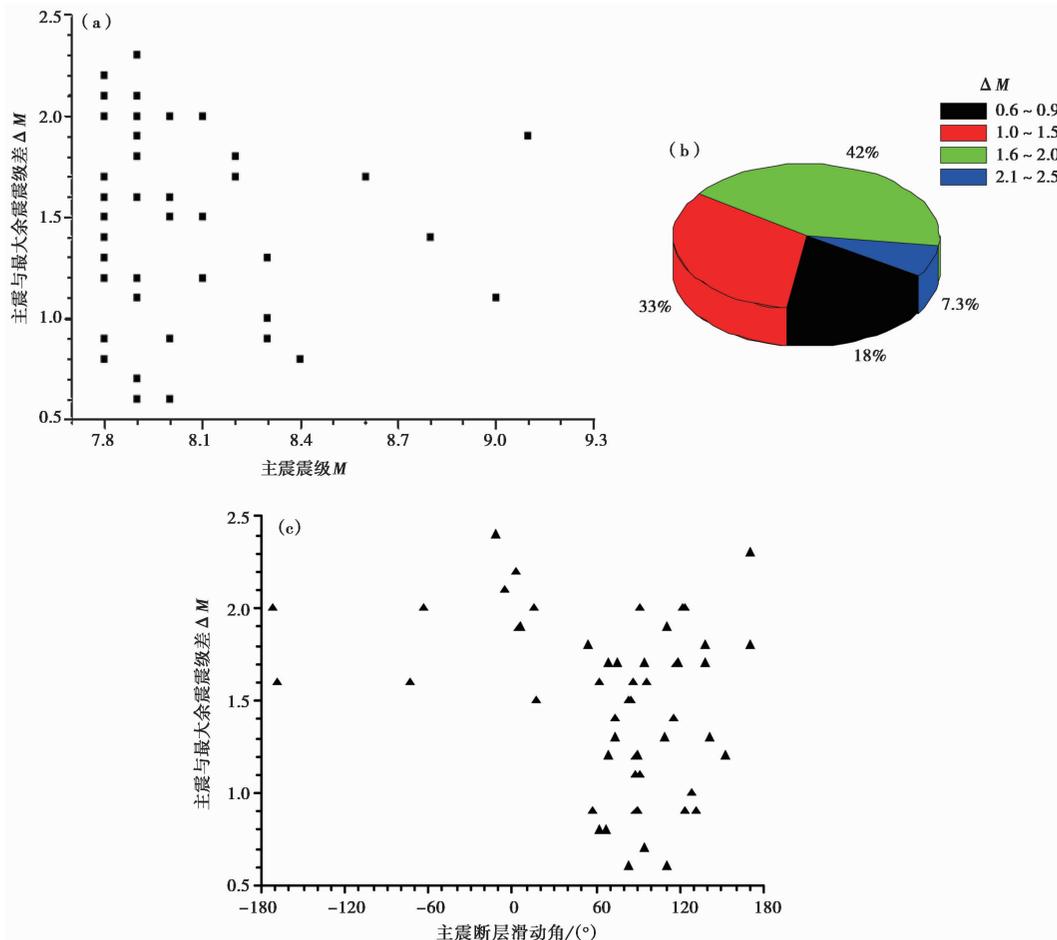


图 4 主-余型地震主震与最大余震的震级差统计
(a) 主震震级与震级差; (b) 震级差百分比统计; (c) 主震断层滑动角与震级差

统计最大余震与主震发震时间差(简称时间差,用 Δt 表示),结果显示(图 6),最大余震主要发生在主震后的半个月内,占总数的 83.6%。具体为,53%的最大余震发生在主震后的 24h 内;15%的最大余震发生在主震后第 1~3 天;11%的最大余震发生在主震后第 9~14 天;9.1%的最大余震发生在主震后第 32~41 天。即 68%的最大余震发生在主震后的 3 天内。此外,约 20%的最大余震发生在主震后 10 天左右与 1 个月左右。统计 Δt 与主震断层滑动角间的关系,结果显示(图 6(c)),最大余震发生的时间与主震断层错动方式间关系不明显。

统计最大余震同主震震中距离($D_{\max\text{-aft}}$)与主震震级间的关系,结果显示(图 7(a)),

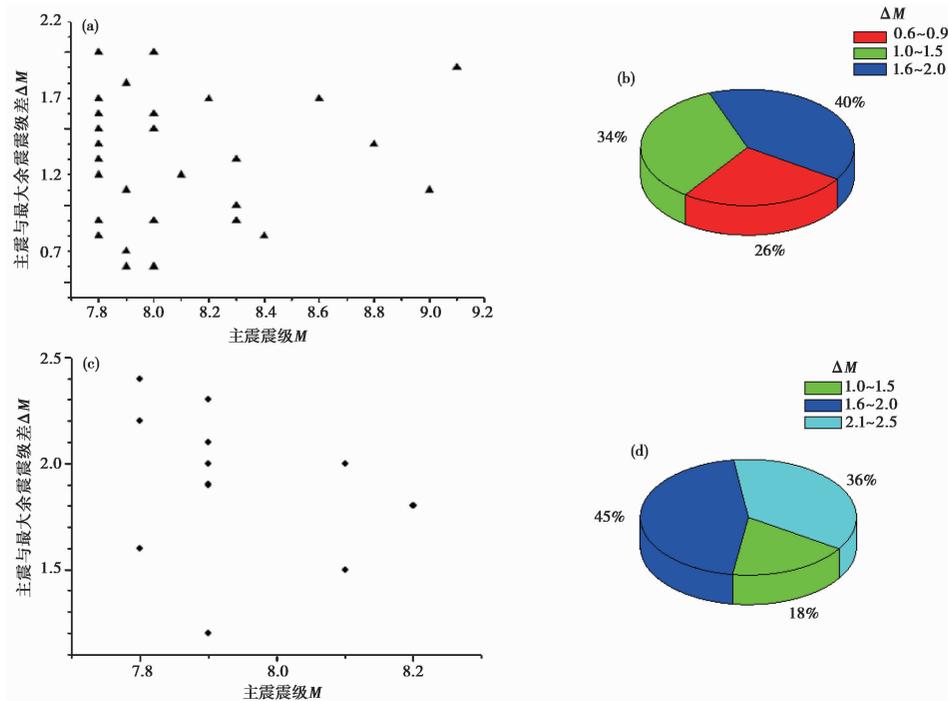


图 5 依据主震震源机制解类型统计震级差 ΔM 分布特征

(a) 逆断层型主震与震级差; (b) 逆断层型 ΔM 百分比分布; (c) 走滑型主震震级与震级差; (d) 走滑型 ΔM 百分比分布

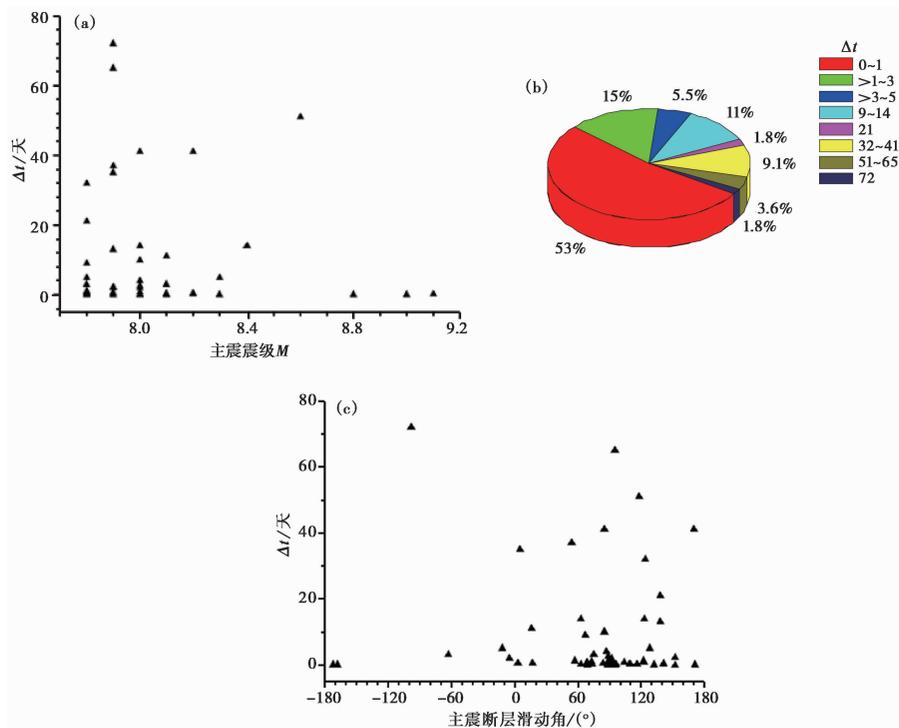


图 6 主-余型地震中主震与最大余震发生时间差 Δt 统计

(a) 主震震级与 Δt ; (b) Δt 百分比统计; (c) 主震断层滑动角与 Δt

$D_{\max\text{-aft}}$ 与主震震级间没有明显的统计关系。对于7.8~8.0级地震,最大余震主要发生在距主震100km范围内,占总数的75.6%;而对于8.1级以上地震,最大余震主要发生在距主震100~300km范围内,占总数的57.1%。

计算 $D_{\max\text{-aft}}$ 与余震区长轴比值,并统计该比值的对数与主震震级间的关系(图7(b))。结果显示,该比值对数与主震震级间没有明显的统计关系。对于所有主-余型序列,49%的 $D_{\max\text{-aft}}$ 不超过余震区长轴的1/3,31%的 $D_{\max\text{-aft}}$ 为余震区长轴的1/3~1/2,15%的 $D_{\max\text{-aft}}$ 大于余震区长轴的1/2(图7(c))。

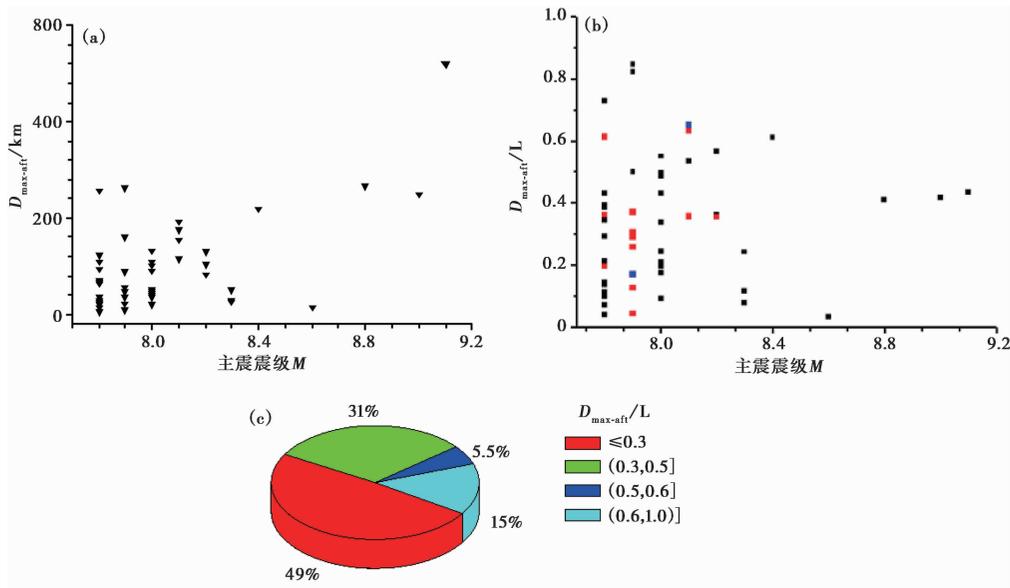


图7 主-余型中主震与最大余震震中距($D_{\max\text{-aft}}$)与主震震级统计

(a) $D_{\max\text{-aft}}$ 与主震震级间的关系;(b) $D_{\max\text{-aft}}$ 与余震区长轴 L 的比值与主震震级分布(黑色、红色和蓝色分别表示逆断层型、走滑型和正断层型地震);(c) $D_{\max\text{-aft}}$ 与 L 比值百分比分布

3 应用 ETAS 模型计算地震序列参数

本文使用 ETAS 模型计算全球巨大地震序列参数。ETAS 模型假设所有余震均可以按照大森-宇津公式 (Omori, 1895; Utsu, 1961) 激发自己的余震,且震级分布是独立的。假定主震的发生为初始零时刻,在其后一个观测时段 $[0, T]$ 内地震序列 $\{(t_i, M_i); i = 1, 2, \dots, N\}$ 的强度函数可以表示为 (Ogata, 1988)

$$\lambda(t) = \mu + K \sum_{t_i < t} \frac{e^{\alpha(M_i - M_0)}}{(t - t_i + c)^p}, M_i > M_0 \quad (1)$$

其中, t 为主震发生后的离逝时间; M_0 为计算所用序列的截止震级; M_i, t_i 分别为第 i 个时间的震级及其距主震发震时刻的时间长度; μ 为背景地震发生率; p 表示序列衰减快慢; c 为主震后余震频次达到峰值的时间长度; K 表示余震的活跃程度; a 表示触发次级余震的能力 (Ogata, 1989, 1992)。

使用最大似然法对 ETAS 模型进行参数估计 (蒋长胜等, 2014)。为了保证有足够多的

样本量,本文挑选主震后 1 个月内发生的余震进行计算,且计算每个序列的完备性震级,当满足完备震级以上地震数量 $N \geq 50$ 时,计算序列参数。共计算了 46 个序列参数,并对 b 值、 a 值和 p 值进行统计分析(表 1)。全部序列 b 值最小为 0.685,最大为 1.651,平均为 1.164 ± 0.211 ; p 值最小为 0.941,最大为 2.801,平均为 1.559 ± 0.412 。与前 2 个参数相比, a 值分布最为分散,范围为 0~3.96,平均为 1.673 ± 0.911 。 b 值、 p 值和 a 值均呈现出 Beta 分布的特点(图 8(a)~8(c))。

表 1 ETAS 模型计算序列参数结果

分类/区域	b 值		a 值		p 值		序列数
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	
全部序列	1.165	0.211	1.673	0.911	1.559	0.412	46
主-余型序列	1.183	0.214	1.654	1.023	1.689	0.949	38
多震型序列	1.079	0.188	1.651	0.472	1.623	0.462	8
板内地震序列	1.185	0.246	2.185	1.211	1.640	0.756	7
板间地震序列	1.161	0.208	1.550	0.862	1.673	0.897	39
逆冲型序列	1.157	0.218	1.405	0.865	1.609	0.402	38
走滑型序列	1.175	0.200	2.742	0.858	1.363	0.517	6
正断型序列	1.278	0.109	1.904	0.039	1.349	0.112	2
太平洋板块西北边界带(I)	1.262	0.154	1.475	0.533	1.424	0.241	7
太平洋板块西南边界带(II)	1.288	0.255	1.431	0.833	1.473	0.164	5
南美板块西边界带(III)	0.976	0.168	1.673	1.103	1.662	0.413	8
北美板块西边界带(IV)	1.0671	0.162	3.332	0.633	1.207	0.341	4
太平洋板块北边界带(V)	1.189	0.250	2.447	1.369	1.274	0.232	3
太平洋板块西边界带中段(VI)	1.091	0.153	1.624	0.335	1.532	0.399	7
苏门答腊附近(VII)	1.261	0.204	1.730	0.722	1.637	0.405	6
爪哇岛附近(VIII)	1.299	0.239	1.295	0.400	1.808	0.5303	4

注:序号与图 8(d)中的序号相对应。

主-余型序列 b 值平均为 1.183 ± 0.214 ,多震型平均为 1.079 ± 0.188 。板内序列 b 值平均为 1.185 ± 0.246 ,板间平均为 1.161 ± 0.208 。可见,不同序列类型及板内、板间地震序列之间 b 值差异不显著。统计不同主震错动类型的平均 b 值可见,逆冲型与走滑型非常接近,均明显小于正断层型。但是正断层型序列仅有 2 个。从不同构造分区(图 8(d))计算结果来看, b 值最小为南美板块西边界带(0.976),最大为爪哇岛附近(1.299)。太平洋板块西边界带 b 值大于北美、南美板块的西边界带(表 1)。统计结果显示,影响序列 b 值的主要因素为区域介质物性和应力状况等。

p 值为序列的衰减率, p 值越大,则表示序列衰减越快。本文的计算结果显示(表 1),不同序列类型及板内、板间地震序列平均 p 值差异不显著。走滑型、正断层型序列的平均 p 值非常接近,分别为 1.363 ± 0.517 、 1.349 ± 0.112 ,而逆断层型序列平均为 1.609 ± 0.402 。可见,逆断层型序列 p 值明显大于走滑型和正断层型序列。这表明,逆冲型序列衰减较快。从不同构造区平均结果来看, p 值最小的区域为北美板块西边界带和太平洋板块北边界带,约为 1.2;太平洋板块西边界带为 1.42~1.53;南美板块西边界带和苏门答腊附近为 1.63~1.66; p 值最大的区域爪哇岛及其附近区域,约为 1.81。显然, p 值具有明显的分区特征(表 1)。

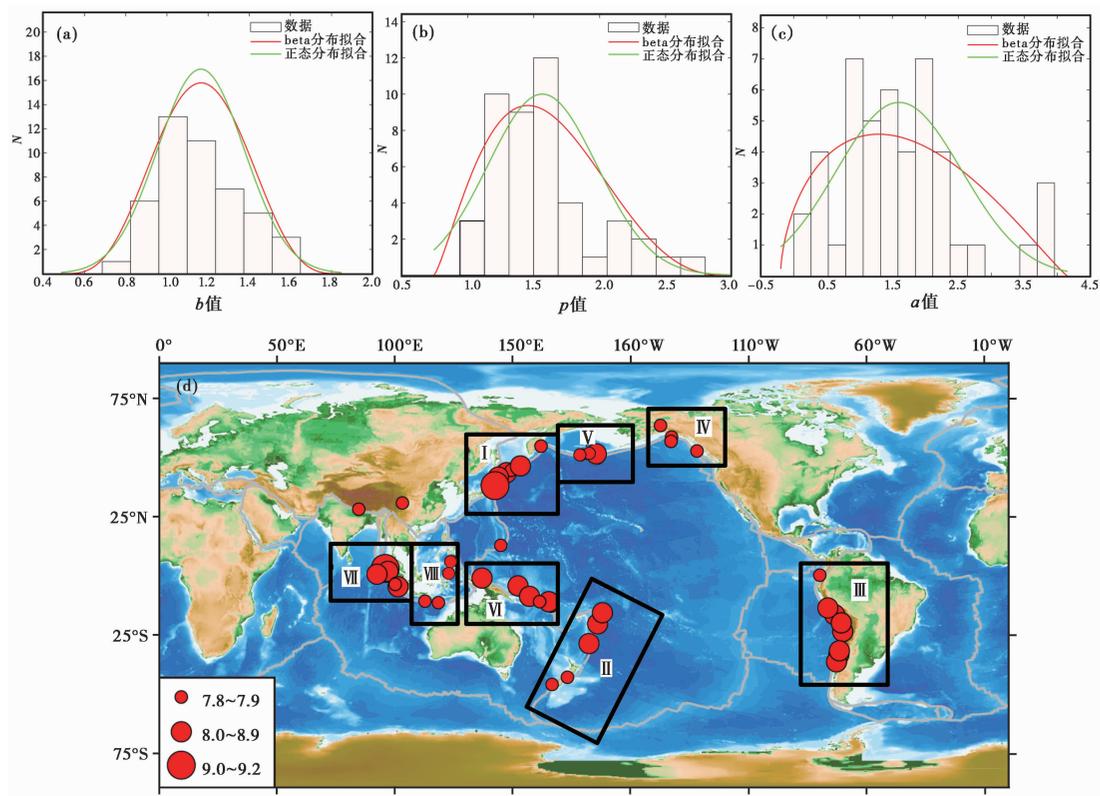


图 8 序列 b 值(a)、 p 值(b)和 a 值(c)分布图与构造分区(d)

图 8(d)中序号与表 1 相对应

a 值表示序列中不同震级地震产生高阶余震的能力。 a 值越小,其“余震激发余震”的能力越强。本文的计算结果显示(表 1),主-余型与多震型序列平均 a 值差异不大。板间、板内地震序列平均 a 值分别为 1.550 ± 0.862 、 2.185 ± 1.211 。显然,板间序列平均 a 值明显小于板内序列。逆断层型序列平均 a 值最小(1.405 ± 0.865),其次是正断层型(1.904 ± 0.039),最大是走滑型序列(2.742 ± 0.858)。这表明,板间地震具有较强的触发次级余震的能力。逆断层型地震序列虽然衰减较快,但其“余震激发余震”的能力却相对较强。不同构造区平均 a 值计算结果显示(表 1), a 值最小的区域为爪哇岛附近, a 值约为 1.3; a 值最大的区域为北美板块西边界带, a 值约为 3.33。

4 余震区规模与主震震级间关系的统计

震源破裂尺度与地震应力降或应变释放程度等物理过程有关(Wells et al, 1994; Biasi et al, 2006)。而余震区规模与震源破裂尺度大体相当,所以研究余震区规模具有科学意义,同时也有助于震后趋势判定(吴开统等, 1990)。许多学者对震源破裂尺度、平均滑动量等参数与震级进行统计,通过线性拟和得到经验关系式(蒋海昆等, 2007a; Wells et al, 1994; 李莹甄等, 2010)。其中, Wells 等(1994)系统统计了由全球 244 个地震震源资料拟合得到的震源破裂尺度与震级间的关系。但是 8 级以上地震样本少, Wells 等(1994)使用的总体统计样本

的震级为 $M_{4.8} \sim 8.1$, 逆断层型地震的统计样本仅为 $M_{5.4} \sim 7.4$ 。不同研究者的统计数据不同, 得到的拟和关系也不同。近年来, 全球发生了多次 8 级以上大震, 特别是一些 8.5 级以上特大地震, 样本量的增多使得研究 8 级以上特大地震的震源破裂尺度与震级间的统计关系成为可能。

本文将全球 1976 年以来 58 次 $M_w \geq 7.8$ 地震的余震区尺度作为震源破裂尺度(附表 1), 此外, 还补充了 1900~1975 年 12 次 $M_w \geq 8.5$ 地震的震源破裂尺度(表 2)。拟和 70 次地震的震源破裂尺度对数与主震震级间的关系(图 9(a)), 得到的统计关系为

$$\lg L = (0.471 \pm 0.039) M_w + (-1.408 \pm 0.323) \quad (2)$$

表 2 1900~1975 年全球 8.5 级以上地震参数

发震日期 (年-月-日)	震中	震级 M_w	破裂尺度 /km	震源 错动类型	资料来源
1905-07-09	49.0°N, 99.0°E	8.5	200	走滑型	国家地震局震害防御司, 1996
1905-07-23	49.0°N, 98.0°E	8.4	300		
1906-08-17	33.0°S, 72.0°W	8.5	400	逆冲型	Beck et al, 1998
1922-11-11	28.55°S, 70.75°W	8.7	470	逆冲型	Kelleher, 1972
1923-02-03	53.85°N, 160.76°E	8.5	200	走滑型	Kuzin et al, 2001; Lallemant et al, 1996
1941-06-26	12.5°N, 92.5°E	8.7	500	逆冲型	张诚等, 1993; 国家地震局震害防御司, 1996
1950-08-15	28.5°N, 96.5°E	8.6	250	逆冲型	郭增建等, 1988
1952-11-04	52.75°N, 159.50°E	9.0	600~700	逆冲型	Haeussler et al, 2004
1957-03-09	51.59°N, 175.42°W	8.6	850	逆冲型	Johnson et al, 1994
1960-05-22	38.29°S, 73.05°W	9.6	1000	逆冲型	Melnick et al, 2008
1963-10-13	44.76°N, 149.80°N	8.6	500	逆冲型	Kuzin et al, 2001
1964-03-28	61.02°N, 147.63°W	9.2	800	逆冲型	Haeussler et al, 2004
1965-02-04	51.21°N, 178.50°W	8.7	600	逆冲型	Beck et al, 1991

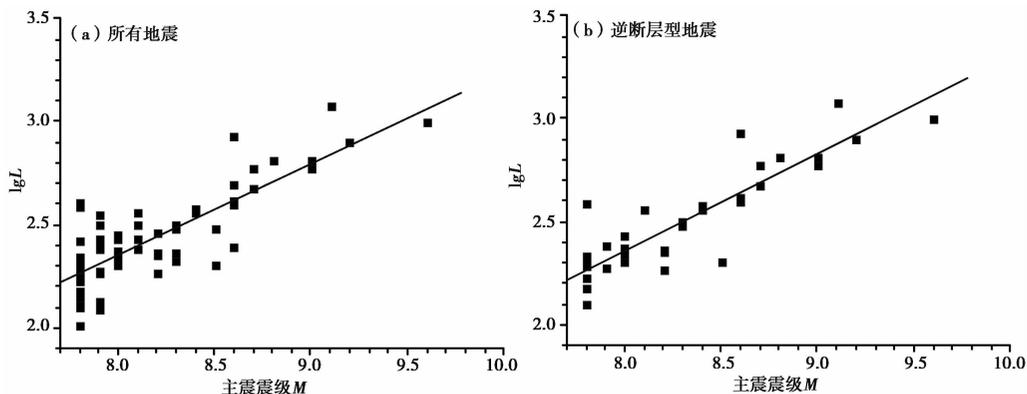


图 9 巨大地震的震源破裂尺度 L 对数与震级间的统计关系

其中, L 为余震区长度, 单位 km。由图 9(a) 可见, 对于 7.8~7.9 级地震, 样本量较大, 但余震区规模比较分散。此外, 1957 年 3 月 9 日阿拉斯加 8.6 级地震(震源破裂尺度达 850km)和 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 9.1 级地震(余震区长达 1200km)有些偏离拟和直线。应用全部样本得到的拟合公式(式(2))的标准差为 0.133, 相关系数为 0.830。统计逆断层型

地震余震区尺度对数与主震震级间的关系(图9(b)),得到的拟合关系为

$$\lg L = (0.470 \pm 0.037)M_w + (-1.399 \pm 0.306) \quad (3)$$

拟合标准差为 0.120, 相关系数为 0.870。与所有样本都参与的统计相比, 逆断层型地震的拟合效果更好。

蒋海昆等(2007b)统计了我国大陆地区不同序列类型地震余震区尺度与主震震级、不同破裂类型地震余震区尺度与主震震级间的关系, 其中, 使用样本量最大(143)的为主-余型序列拟合的结果(式(3)), 相关系数为 0.57, 拟合均方差为 0.57。拟合线性关系最好的为走滑-近走滑型地震余震区尺度与主震震级, 公式如下所示, 其相关系数为 0.68, 拟合均方差为 0.325。与本文的结果相比, 蒋海昆等(2007a)统计结果的离散程度较高。

$$\lg L = (0.347 \pm 0.042)M_s + (-0.622 \pm 0.253) \quad (4)$$

Wells 等(1994)给出的逆冲型地震的震源破裂尺度与矩震级间的关系为(统计范围为 $M_w 5.4 \sim 7.4$)

$$\lg L = (-2.86 \pm 0.55) + (0.63 \pm 0.08)M_w \quad (5)$$

陈培善等(1991)给出的破裂长度与面波震级间的关系式为(适用的震级范围为 $M_s 7.8 \sim 8.5$)

$$\lg L = M_s - 5.84 \quad (6)$$

如果计算一个 $M_w 8.0$ 地震的破裂长度, 根据式(3)、(4)、(5)、(6)可分别得到破裂长度为 229、143、151、115km。显然本文的结果比其他研究者的要大。这主要是因为蒋海昆等(2007b)使用 M_s 震级, 统计范围为 5 级以上, 且 8 级以上样本少。本文使用 M_w 震级, 统计范围为 7.8~9.1 级地震。Wells 等(1994)的统计样本中没有涉及 8 级以上巨大地震, 而且其统计的震源破裂尺度主要来源于野外考察、地震波反演及各种结果的平均值(对于同一个地震, 如果有多个不同来源的震源参数, 又无法确定哪个最为准确, 则取平均值)。陈培善等(1991)给出的统计关系是基于二维破裂模式的地震定标律, 而地震定标律是建立在地震相似性基础上的, 地震相似性包括几何相似性、应力环境相似性和动力学相似性等。如果单个地震偏离相似性越远, 则相应估计值的误差就越大。对于同一个地震, 其余震区规模、野外考察得到的地表破裂带尺度及通过地震波反演得到的震源破裂规模有较大的差异。例如, 2001 年 11 月 14 日我国昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震的余震区长约 420km, 而野外考察地表破裂带的长度为 425km(中国地震局监测预报司, 2002), 而震源破裂过程反演得到的滑动量大于 0.5m 的区域长 600km(许力生等, 2004)。野外考察的结果受破裂出露地表情况的影响; 波形资料反演结果主要受震源模型、资料的空间分辨率等因素的影响; 余震区尺度受地震定位精度的影响较大。当地震定位精度较高时, 余震区规模可以较好地反映震源破裂的尺度。

5 结论与讨论

本文系统研究了 1976 年以来全球 58 次 $M_w \geq 7.8$ 浅源地震序列的统计特征, 包括序列类型划分、最大余震与主震的震级差、时间差和震中距离等。取主震后 1 个月内的余震数据, 应用 ETAS 模型计算了 46 次地震序列参数, 并从板内、板间地震及主震破裂类型等角度讨论计算结果。主要得到以下几点结论:

(1) 1976 年以来全球共发生 58 次 7.8 级以上浅源地震, 其中, 板内地震 13 次, 板间地震 45 次, 板内地震与板间地震数量之比为 1/3.46。与板间地震相比, 板内地震强度低。

(2)在板间地震中,74.1%为逆断层,而61.5%的板内地震为走滑型。即板间地震主要为逆断层型,而板内地震主要为走滑型。

(3)在58次巨大地震中,82.8%为主-余型,其余17.2%为多震型。与5级以上地震不同,巨大地震没有孤立型,表明其余震较活跃。在板内地震中,多震型仅占总数的7.7%;板间地震中,多震型地震占总数的20%。

(4)对主-余型地震,75%的主震与最大余震的震级差为1.0~2.0级。震级差与主震震源断层错动类型有关。逆断层序列的震级差为0.6~2.0级,其中,74%的震级差为1.0~2.0级;而走滑型序列的震级差为1.0~2.5级,其中,81%的震级差为1.6~2.5级。即走滑型序列的震级差明显大于逆断层型序列。

(5)在主-余型序列中,53%的最大余震发生在主震后24h内,15%发生在主震后第2~3天,11%发生在主震后第9~14天。最大余震发生时间与主震断层错动方式间的关系不明显。49%的 $D_{\max-aft}$ (主震震中与最大余震震中之间的距离)不超过余震区长轴的1/3,31%的 $D_{\max-aft}$ 为余震区长轴的1/3~1/2,15%的 $D_{\max-aft}$ 大于余震区长轴的1/2。 $D_{\max-aft}$ 与主震震级及主震错动类型间没有明显的统计关系。

(6)应用ETAS模型计算了46次序列参数。 b 值平均为 1.164 ± 0.211 , p 值平均为 1.559 ± 0.412 , a 值平均为 1.673 ± 0.911 。与前2个参数相比, a 值分布最为分散。 b 、 p 、 a 值均呈Beta分布。不同序列类型、不同震源机制及板内、板间地震序列 b 值差异不显著,不同构造区域 b 值差异较明显。不同序列类型及板内、板间地震序列平均 p 值差异不明显,而主震错动类型对 p 值有影响,逆断层型序列 p 值明显大于走滑型和正断层型。与 b 值相似, p 值也具有明显的构造分区特征。不同序列类型的平均 a 值差异不明显。板间序列平均 a 值明显小于板内序列,逆断层型序列明显小于走滑和正断层型。这表明,板间地震具有相对较强的触发次级余震的能力,逆断层型地震序列虽然衰减较快,但“余震激发余震”的能力相对较强,这与震级差(主震与最大余震的震级差)的统计结果一致。 a 值也具有明显的构造分区特征。

(7)本文统计了巨大地震,特别是逆断层型大震余震区规模与主震震级间的关系。结果表明,余震区长轴对数与主震震级间呈正相关关系,其中,逆断层型地震的拟合结果优于所有样本的统计结果。

以上统计结果对大震后的趋势判定具有实践意义和减灾意义。此外,本文比较了不同序列类型、不同震源错动类型及板内、板间地震序列参数的共性和差异性,其结果对于科学研究具有一定的参考价值。由于构造分区样本量较少,所以对于序列参数区域性差异性没有进行深入分析。

参考文献

- 陈培善、白彤霞,1991,震源参数之间的定量关系,地震学报,13(4),401~411.
- 郭增建、马宗晋,1988,中国特大地震研究,252~279,北京:地震出版社.
- 国家地震局震害防御司,1996,全球重大灾害性地震目录(2150B.C.-1991A.D.),108~109,北京:地震出版社.
- 蒋长胜、韩立波、郭路杰,2014,新疆于田地区2008年以来3个地震序列的参数早期特征,地震学报,36(2),165~174.
- 蒋海昆、傅征祥、刘杰等,2007a,中国大陆地震序列研究,1~175,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的空间分布特征,地震学报,28(4),389~398.
- 蒋海昆、郑建常、吴琼等,2007b,中国大陆中强以上地震余震分布尺度的统计特征,地震学报,29(2),151~164.
- 蒋海昆、郑建常、吴琼等,2007c,传染型余震序列模型震后早期参数特征及其地震学意义,地球物理学报,50(6),1778~1786.

- 李莹甄、唐兰兰,2010,新疆中强地震序列特征参数与主震震级的统计关系,内陆地震,24(4),307~314.
- 吕晓健、高孟潭、陈丹,2010,全球大陆7级浅源大地震强余震震级和空间分布特征,地震,30(3),108~122.
- 梅世蓉、宋治平、薛艳,1996,中国巨大地震前地震活动环形分布图象与规律,地震学报,18(4),413~419.
- 苏有锦、李忠华、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、吕培苓等,1990,地震序列概论,北京:北京大学出版社.
- 许力生、陈运泰,2004,从全球长周期波形资料反演2001年11月14日昆仑山口地震时空破裂过程,中国科学:D辑,34(3),256~264.
- 张诚、修济刚、邱同芝等,1993,全球强震震源机制,北京:万国学术出版社.
- 中国地震局监测预报司,2002,2001年昆仑山口西8.1级大地震,24~34,北京:地震出版社.
- 庄建仓、马丽,2000,主震和余震——从大森公式到ETAS模型,国际地震动态,(5),12~18.
- Beck S L, Christensen D H, 1991, Rupture process of the February 4, 1965, Rat Islands earthquake, *J Geophys Res*, **96**(B2), 2205~2221.
- Beck S, Barrientos S, Kausel E, et al, 1998, Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction Askew et al zone, *J South Am Earth Sci*, **11**(2), 115~129.
- Biasi G P, Weldon II R J, 2006, Estimating surface rupture length and magnitude of paleoearthquakes from point measurements of rupture displacement, *Bull Seismol Soc Am*, **96**(5), 1612~1623.
- Chen X W, Shearer P M, 2013, California foreshock sequences suggest aseismic triggering process, *Geophys Res Lett*, **40**(11), 2602~2607, doi:10.1002/grl.50444.
- Chen X W, Shearer P M, 2016, Analysis of foreshock sequences in California and implications for earthquake triggering, *Pure Appl Geophys*, **173**(1), 133~152, doi:10.1007/s00024-015-1103-0.
- Guo Z Q, Ogata Y, 1997, Statistical relations between the parameters of aftershocks in time, space, and magnitude, *J Geophys Res*, **102**(B2), 2857~2873.
- Haeussler P J, Plafker G, 2004, Earthquakes in Alaska, U S Geological Survey Open-File Report, 95~624, USGS.
- Johnson J M, Tanioka Y, Ruff L J, et al, 1994, The 1957 great Aleutian earthquake, *Pure Appl Geophys*, **142**(1), 3~28.
- Kagan Y Y, Bird P, Jackson D D, 2010, Earthquake patterns in diverse tectonic zones of the globe, *Pure Appl Geophys*, **167**(6/7), 721~741.
- Kanamori H, Anderson D L, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull Seismol Soc Am*, **65**(5), 1073~1095.
- Kelleher J A, 1972, Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions, *J Geophys Res*, **77**(11), 2087~2103.
- Kuzin I P, Lobkovsky L I, Solov'eva O N, 2001, Characteristics of seismicity in the central kurile region, *Izvest, Phys Solid Earth*, **37**(6), 464~473.
- Lallemant S J, Le Pichon X, Thoué F, et al, 1996, Shear partitioning near the central Japan triple junction: the 1923 great Kanto earthquake revisited-I, *Geophys J Int*, **126**(3), 871~881.
- Melnick D, Moreno M, Strecker M S, et al, 2009, Tectonic controls on the 1960 Chile earthquake rupture segment, *Geophysical Research Abstracts*, 11, 5998, EGU2009-5998, EGU General Assembly 2009.
- Mogi K, 1974, Active periods in the world's chief seismic belts, *Tectonophysics*, **22**(3/4), 265~282.
- Ogata Y, 1989, Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis, *Tectonophysics*, **169**(1/2/3), 159~174.
- Ogata Y, 1992, Detection of precursory relative quiescence before great earthquakes through a statistical model, *J Geophys*, **97**(B13), 19845~19871.
- Omori F, 1895, On the after-shocks of earthquakes, *J Coll Sci, Imp Univ, Japan*, **7**(2), 111~200.
- Utsu T, 1961, A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophy Mag*, **30**, 521~605.
- Wells D L, Coppersmith K J, 1994, New empirical Relationships among magnitude, rupture length, rupture width, Rupture area, and surface displacement, *Bull Seismol Soc Am*, **84**(4), 974~1002.
- Wiemer S, Wyss M, 2002, Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes, *Adv Geophys*, **45**(7), 259~302.
- Woessner J, Wiemer S, 2005, Assessing the quality of earthquake catalogues: estimating the magnitude of completeness and its uncertainty, *Bull Seismol Soc Am*, **95**(2), 684~698.

Statistical Characteristics of the Global Great Shallow-focus Earthquake Sequences

Xue Yan¹⁾ Liu Jie¹⁾ Liu Shuangqing²⁾

1) Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China

Abstract In this paper, we studied the statistical characteristics of 58 global great shallow-focus earthquake sequences with $M_w \geq 7.8$ since 1976. Results showed: ① There are 45 interplate events and 13 intraplate shocks among the 58 great earthquakes. The magnitude of intraplate earthquakes is lower than that of interplate ones. ② 74.1% of the interplate earthquakes are thrusting ones, and 61.5% of intraplate earthquakes are strike slips. ③ Among the 58 large earthquake sequences, 82.8% are of the mainshock-aftershock type and 17.2% are of the multiple mainshock type. Different from the $M \geq 5.0$ earthquake sequences, there is no isolated earthquake type in great earthquake sequences and their aftershock activity levels are high. The proportion of multiple mainshock type in intraplate earthquakes and interplate earthquakes is 7.7% and 20% respectively. ④ For the mainshock-aftershock sequences, events with magnitude difference ΔM between the main shock and the largest aftershock ranging from 1.0 to 2.0, consist of 75% of the total. The ΔM value of the strike-slip sequence is obviously larger than that of the thrust type. 68% of the largest aftershocks occurred during 3 days after the main shock, and secondly occurred about 10 days and about 1 month. The 49% epicentral distances $D_{\max\text{-aft}}$ of the mainshock and the largest aftershock are not exceed one-third of the aftershock zone scale, and 31% is from one-third to one-half of the aftershock zone scale. The differences of Δt (the occurring time interval of the mainshock and the largest aftershock) and $D_{\max\text{-aft}}$ are not obvious for different modes of mainshock fracture. ⑤ Parameters of 46 earthquake sequences were calculated by ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) model. The data of b -value, p -value and a -value are of beta distribution. The average b -value is 1.164 ± 0.211 , the average p -value is 1.559 ± 0.412 and the average a -value is 1.673 ± 0.911 . It is seen that p -value and a -value are dispersed. The differences of b -value are not obvious for different types of earthquake sequences, for different modes of mainshock fracture, for intraplate and interplate earthquakes. The p -value of the sequence with the main shock as a thrust is greater than that of the strike-slip and normal faults. The a -value of the interplate earthquake sequences is smaller than that of the intraplate ones. This indicates that the interplate earthquake has a high ability to generate higher order aftershocks. The a -value of the sequence with thrusting fracture mainshock is smaller than that of the strike-slip and normal fracture. This means although thrust rupture can cause faster decay of sequences, the ability to generate higher order aftershocks is relatively strong. ⑥ The fitting relation between the scale of aftershock area L and the magnitude of mainshock M_w for thrust earthquakes is $\lg L = (-1.399 \pm 0.306) + (0.470 \pm 0.037) M_w$.

Key words: Shallow-focus large earthquake; Sequence type; Mainshock-aftershock sequence type; Multiple mainshock type; Isolated earthquake type; Intraplate earthquake; Interplate earthquake

附表 1

序号	发震日期 (年-月-日)	震中	震级 M_w	震源 深度 /km	震源机制解 走向/倾角/滑动角(°)	最大余震或第 2、3 主震 发震日期(年-月-日) /震级/震源深度	主震与最大余震 震级差 ΔM ; 时间差 Δt ; 震中距 Δd	余震区长轴 /km	序列 类型
1	1976-01-14	28.43°S, 177.66°W	8.0	33	189/11/71, 28/80/93 $P_{\text{plug}} = 34.5; T_{\text{plug}} = 55.2$; 逆断/板间	1976-01-14/M7.8/69km		224	多震型
2	1976-08-16	6.26°N, 124.02°E	7.9	33	34.1/35/92, 158/55/89 $P_{\text{plug}} = 10.0; T_{\text{plug}} = 79.9$; 逆断 T/板内	1976-08-17/M6.8/22km	$\Delta M = 1.1; \Delta t = 0.63\text{d};$ $\Delta d = 160\text{km}$	189	主-余型
3	1977-08-19	11.09°S, 118.46°E	7.9	33	260/24/-73, 61/67/-98 $P_{\text{plug}} = 67.05; T_{\text{plug}} = 21.61$; 正断/板间	1977-10-31/M6.3/33km	$\Delta M = 1.6; \Delta t = 72\text{d};$ $\Delta d = 46\text{km}$	270	主-余型
4	1979-09-12	1.68°S, 136.04°E	7.9	5	100/71/5, 8/85/161 $P_{\text{plug}} = 9.9; T_{\text{plug}} = 16.77$; 走滑/板间	1979-10-17/M6.0/33km	$\Delta M = 1.9; \Delta t = 35\text{d};$ $\Delta d = 46\text{km}$	124	主-余型
5	1980-07-17	12.53°S, 165.92°E	7.9	33	351/31/102, 158/60/83 $P_{\text{plug}} = 14.47; T_{\text{plug}} = 74.23$; 逆断/板间	1980-07-08/M7.5/33km		240	多震型
6	1985-03-03	33.14°S, 71.87°W	8.0	33	11/26/110, 169/66/81 $P_{\text{plug}} = 20.14; T_{\text{plug}} = 67.95$; 逆断/板间	1985-03-04/M7.4/33km 1985-04-05/M7.2/38km	$\Delta M = 0.6, 0.8;$ $\Delta t = 0.07, 32\text{d};$ $\Delta d = 21, 113\text{km}$	228	主-余型
7	1985-09-19	18.19°N, 102.53°W	8.0	28	301/18/105, 106/73/85 $P_{\text{plug}} = 27.48; T_{\text{plug}} = 62.07$; 逆断/板间	1985-09-21/M7.6/31km		238	多震型
8	1986-05-07	51.52°N, 174.78°W	8.0	33	246/22/85, 72/68/92 $P_{\text{plug}} = 23.06; T_{\text{plug}} = 66.85$; 逆断/板间	1986-05-17/M6.5/26km 1986-06-18/M6.5/27km	$\Delta M = 1.5, 1.5;$ $\Delta t = 10, 41\text{d};$ $\Delta d = 91, 131\text{km}$	270	主-余型
9	1987-11-30	58.68°N, 142.79°W	7.9	10	355/70/-172, 262/82/-20 $P_{\text{plug}} = 19.53; T_{\text{plug}} = 8.59$; 走滑/板内	1987-11-30/M5.9/10km	$\Delta M = 2.0; \Delta t = 25\text{min};$ $\Delta d = 49\text{km}$	160	主-余型
10	1988-03-06	56.95°N, 143.03°W	7.8	10	182/75/-168, 89/79/-15 $P_{\text{plug}} = 18.97; T_{\text{plug}} = 2.35$; 走滑/板内	1988-03-06/M6.2/10km	$\Delta M = 1.6; \Delta t = 39\text{min};$ $\Delta d = 63\text{km}$	174	主-余型
11	1989-05-23	52.34°S, 160.57°E	8.2	10	34/69/170, 127/81/21 $P_{\text{plug}} = 7.98; T_{\text{plug}} = 21.59$; 走滑/板间	1989-07-03/M6.4/33km	$\Delta M = 1.8; \Delta t = 41\text{d}$ $\Delta d = 103\text{km}$	290	主-余型

续附表 1

序号	发震日期 (年-月-日)	震中	震级 M_w	震源 深度 /km	震源机制解 走向/倾角/滑动角($^{\circ}$)	最大余震或第 2、3 主震 发震日期(年-月-日) /震级/震源深度	主震与最大余震 震级差 ΔM ; 时间差 Δt ; 震中距 Δd	余震区长轴 /km	序列 类型
12	1990-04-18	1.19°N, 122.86°E	7.8	26	112/31/122, 257/64/73 $P_{\text{plug}} = 17.33$; $T_{\text{plug}} = 66.60$; 逆断/板内	1990-04-18/M6.5/19km 1990-04-19/M6.5/24km	$\Delta M = 1.3$; $\Delta t = 1.3$ h; $\Delta d = 5.23$ h; $\Delta d = 24.65$ km	168	主-余型
13	1992-12-12	8.48°S, 121.90°E	7.8	28	80/40/95, 253/50/86 $P_{\text{plug}} = 5.10$; $T_{\text{plug}} = 83.97$; 逆断/板内	1992-12-12/M6.1/21km	$\Delta M = 1.7$; $\Delta t = 1$ h; $\Delta d = 6$ km	146	主-余型
14	1993-08-08	12.98°N, 144.80°E	7.8	59	312/18/147, 75/80/75 $P_{\text{plug}} = 33.36$; $T_{\text{plug}} = 52.70$; 逆断/板间	1993-08-11/M6.1/22km	$\Delta M = 1.7$; $\Delta t = 3$ d; $\Delta d = 94$ km	218	主-余型
15	1994-06-02	10.48°S, 112.84°E	7.8	18	278/7/89, 99/83/90 $P_{\text{plug}} = 38.0$; $T = 52.0$; 逆断/板间	1994-06-03/M6.6/26km	$\Delta M = 1.2$; $\Delta t = 1.1$ d $\Delta d = 14$ km	193	主-余型
16	1994-10-04	43.77°N, 147.32°E	8.3	14	158/41/24, 50/74/128 $P_{\text{plug}} = 19.92$; $T_{\text{plug}} = 46.93$; 逆断/板间	1994-10-09/M7.3/33km	$\Delta M = 1.0$; $\Delta t = 5$ d; $\Delta d = 51$ km	210	主-余型
17	1994-12-28	40.53°N, 143.42°E	7.8	27	179/12/67, 22/79/95 $P_{\text{plug}} = 33.80$; $T_{\text{plug}} = 55.79$; 逆断/板间	1995-01-06/M7.0/27km	$\Delta M = 0.8$; $\Delta t = 9$ d; $\Delta d = 109$ km	150	主-余型
18	1995-07-30	23.34°S, 70.29°W	8.0	29	354/22/87, 177/68/91 $P_{\text{plug}} = 23.02$; $T = 66.95$; 逆断/板间	1995-08-03/M6.4/16km	$\Delta M = 1.6$; $\Delta t = 4$ d; $\Delta d = 44$ km	220	主-余型
19	1995-10-09	19.06°N, 104.21°W	8.0	33	302/9/92, 120/81/90 $P_{\text{plug}} = 36$; $T_{\text{plug}} = 53.99$; 逆断/板间	1995-10-12/M6.0/16km	$\Delta M = 2.0$; $\Delta t = 2$ d $\Delta d = 35$ km	200	主-余型
20	1995-12-03	44.66°N, 149.30°E	7.9	33	225/12/95, 40/78/89 $P_{\text{plug}} = 33.04$; $T_{\text{plug}} = 56.94$; 逆断/板间	1996-02-07/M7.2/43km	$\Delta M = 0.7$; $\Delta t = 65$ d; $\Delta d = 88$ km	188	主-余型
21	1996-01-01	0.73°N, 119.93°E	7.9	24	36/6/54, 252/85/94 $P_{\text{plug}} = 40.05$; $T_{\text{plug}} = 49.73$; 逆断/板内	1996-02-07/M6.1/14km	$\Delta M = 1.8$; $\Delta t = 37$ d; $\Delta d = 35$ km	135	主-余型
22	1996-02-17	0.89°S, 136.95°E	8.2	33	103/11/69, 305/80/94 $P_{\text{plug}} = 34.62$; $T_{\text{plug}} = 55.09$; 逆断/板间	1996-02-17/M6.5/19km 1996-02-17/M6.5/31km	$\Delta M = 1.7$; $\Delta t = 9.14$ h; $\Delta d = 83.130$ km	230	主-余型
23	1996-06-10	51.56°N, 177.63°W	7.9	33	248/17/84, 74/74/92 $P_{\text{plug}} = 28.07$; $T_{\text{plug}} = 61.68$; 逆断/板间	1996-06-10/M7.3/26km	$\Delta M = 0.6$; $\Delta t = 1$ h; $\Delta d = 57$ km	190	主-余型

续附表 1

序号	发震日期 (年-月-日)	震中	震级 M_w	震源 深度 /km	震源机制解 走向/倾角/滑动角($^{\circ}$)	最大余震或第 2、3 主震 发震日期(年-月-日) /震级/震源深度	主震与最大余震 震级差 ΔM ; 时间差 Δt ; 震中距 Δd	余震区长轴 /km	序列 类型
24	1997-12-05	54.84°N, 162.04°E	7.8	33	$P_{\text{plug}} = 202/23/74, 39/68/97$ $P_{\text{plug}} = 22.66; T_{\text{plug}} = 66.42$; 逆断/板内	1997-12-05/M6.4/33km	$\Delta M = 1.4; \Delta t = 7h$; $\Delta d = 122km$	199	主-余型
25	1998-03-25	62.88°S, 149.53°E	8.1	10	$P_{\text{plug}} = 281/84/17, 189/73/174$ $P_{\text{plug}} = 7.57; T_{\text{plug}} = 16.23$; 走滑/板内	1998-03-25/M6.4/10km	$\Delta M = 1.5; \Delta t = 9h$; $\Delta d = 114km$	320	主-余型
26	2000-06-04	4.72°S, 102.09°E	7.9	33	$P_{\text{plug}} = 92/55/152, 199/67/38$ $P_{\text{plug}} = 7.68; T_{\text{plug}} = 42.65$; 走滑/板间	2000-06-04/M6.7/33km 2000-06-07/M6.7/33km	$\Delta M = 1.2; \Delta t = 11 \text{ min}, 2.3d$; $\Delta d = 8, 23km$	183	主-余型
27	2000-06-18	13.80°S, 97.45°E	7.9	10	$P_{\text{plug}} = 161/63/-5, 254/85/-153$ $P_{\text{plug}} = 22.08; T_{\text{plug}} = 15.43$; 走滑/板内	2000-06-20/M5.8/10km	$\Delta M = 2.1; \Delta t = 2d$; $\Delta d = 36km$	125	主-余型
28	2000-11-16	3.98°S, 152.17°E	8.0	24	$P_{\text{plug}} = 328/43/3, 236/88/133$ $P_{\text{plug}} = 29.47; T_{\text{plug}} = 32.85$; 走滑/板间	2000-11-16/M7.8/30km 2000-11-17/M7.8/33km		280	多震型
29	2001-06-23	-16.26°S, -73.64°W	8.4	33	$P_{\text{plug}} = 310/18/63, 159/74/98$ $P_{\text{plug}} = 28.54; T = 60.13$; 逆断/板间	2001-07-07/M7.6/33km	$\Delta M = 0.8; \Delta t = 14d$; $\Delta d = 220km$	360	主-余型
30	2001-11-14	35.95°N, 90.54°E	7.8	10	$P_{\text{plug}} = 94/61/-12, 190/80/-15$ $P_{\text{plug}} = 28.12; T_{\text{plug}} = 12.37$; 走滑/板内	2001-11-19/M5.7/10km	$\Delta M = 2.4; \Delta t = 5d$; $\Delta d = 257km$	420	主-余型
31	2002-11-03	63.52°N, 147.44°W	7.9	5	$P_{\text{plug}} = 296/71/171, 29/82/19$ $P_{\text{plug}} = 7.22; T = 19.56$; 走滑/板内	2002-11-03/M5.6/4km	$\Delta M = 2.3; \Delta t = 20 \text{ min}$; $\Delta d = 91km$	353	主-余型
32	2003-09-25	41.81°N, 143.91°E	8.3	27	$P_{\text{plug}} = 250/11/132, 28/82/83$ $P_{\text{plug}} = 36.43; T_{\text{plug}} = 52.60$; 逆断/板间	2003-09-25/M7.4/33km	$\Delta M = 0.9; \Delta t = 0.04 \text{ 天}$ $\Delta d = 27km$	230	主-余型
33	2003-11-17	51.15°N, 178.65°E	7.8	33	$P_{\text{plug}} = 280/19/122, 67/74/80$ $P_{\text{plug}} = 28.25; T_{\text{plug}} = 59.75$; 逆断/板间	2003-11-18/M5.8/33km	$\Delta M = 2.0; \Delta t = 1.2d$; $\Delta d = 20km$	177	主-余型
34	2004-12-23	49.31°S, 161.35°E	8.1	10	$P_{\text{plug}} = 69/74/167, 163/78/16$ $P_{\text{plug}} = 2.41; T = 20.35$; 走滑/板间	2005-01-03/M6.1/10km	$\Delta M = 2.0; \Delta t = 11d$; $\Delta d = 154km$	244	主-余型
35	2004-12-26	3.30°N, 95.98°E	9.1	30	$P_{\text{plug}} = 329/8/110, 129/83/87$ $P_{\text{plug}} = 37.43; T_{\text{plug}} = 52.44$; 逆断/板间	2004-12-26/M7.2/39km	$\Delta M = 1.9; \Delta t = 3.5h$; $\Delta d = 520km$	1200	主-余型

续附表 1

序号	发震日期 (年-月-日)	震中	震级 M_w	震源 深度 /km	震源机制解 走向/倾角/滑动角($^{\circ}$)	最大余震或第 2、3 主震 发震日期(年-月-日) /震级/震源深度	主震与最大余震 震级差 ΔM ; 时间差 Δt ; 震中距 Δd	余震区长轴 /km	序列 类型
36	2005-03-28	2.09°N, 97.11°E	8.6	30	$P_{\text{plug}} = 333/8/118, 125/83/86$ $P_{\text{plug}} = 37.83; \tau = 51.92$; 逆断/板间	2005-05-19/M6.9/30km $\Delta M = 1.7; \Delta t = 51 \text{ 天};$ $\Delta d = 14 \text{ km}$	420	主-余型	
37	2006-05-03	20.19°S, 174.12°W	8.0	55	$P_{\text{plug}} = 226/22/123, 11/72/78$ $P_{\text{plug}} = 25.69; \tau_{\text{plug}} = 61.37$; 逆断/板间	2006-05-04/M6.0/11km 2006-05-17/M6.0/11km $\Delta M = 2.0; \Delta t = 20 \text{ h}, 14 \text{ d};$ $\Delta d = 40, 50 \text{ km}$	205	主-余型	
38	2006-11-15	46.59°N, 153.27°E	8.3	10	$P_{\text{plug}} = 215/15/92, 33/75/89$ $P_{\text{plug}} = 30.01; \tau_{\text{plug}} = 59.99$; 逆断/板间	2007-01-13/M8.1/10km	300	多震型	
39	2007-04-01	-8.47°S, 157.04°E	8.1	24	$P_{\text{plug}} = 333/37/121, 117/59/69$ $P_{\text{plug}} = 11.63; \tau_{\text{plug}} = 68.44$; 逆断/板间	2007-04-01/M6.9/10km $\Delta M = 1.2; \Delta t = 0.02 \text{ d};$ $\Delta d = 192 \text{ km}$	360	主-余型	
40	2007-08-15	13.39°S, 76.60°W	8.0	39	$P_{\text{plug}} = 321/28/63, 171/65/104$ $P_{\text{plug}} = 19.18; \tau_{\text{plug}} = 66.94$; 逆断/板间	2007-08-16/M6.4/23km $\Delta M = 1.6; \Delta t = 5 \text{ h};$ $\Delta d = 110 \text{ km}$	200	主-余型	
41	2007-09-12	4.44°S, 101.37°E	8.4	34	$P_{\text{plug}} = 317/19/102, 125/71/86$ $P_{\text{plug}} = 26.32; \tau_{\text{plug}} = 63.35$; 逆断/板间	2007-09-12/M7.9/35km 2007-09-13/M7.0/22km	380	多震型	
42	2008-05-12	31.00°N, 103.32°E	7.9	19	$P_{\text{plug}} = 231/35/138, 357/68/63$ $P_{\text{plug}} = 17.93; \tau_{\text{plug}} = 58.28$; 逆断/板内	2008-05-25/M6.1/21km $\Delta M = 1.8; \Delta t = 13 \text{ d};$ $\Delta d = 263 \text{ km}$	320	主-余型	
43	2009-07-15	45.76°S, 166.56°E	7.8	12	$P_{\text{plug}} = 25/26/138, 154/73/70$ $P_{\text{plug}} = 25.35; \tau = 57.45$ 逆断/板间	2009-08-05/M6.1/10km $\Delta M = 1.7; \Delta t = 21 \text{ d};$ $\Delta d = 30 \text{ km}$	141	主-余型	
44	2009-09-29	15.49°S, 172.10°W	8.1	18	$P_{\text{plug}} = 119/38/-131, 346/62/-63$ $P_{\text{plug}} = 62.65; \tau_{\text{plug}} = 12.96$; 正断/板间	2009-10-02/M6.1/8km $\Delta M = 2.0; \Delta t = 3 \text{ d};$ $\Delta d = 175 \text{ km}$	270	主-余型	
45	2009-10-07	13.01°S, 166.51°E	7.8	45	$P_{\text{plug}} = 344/41/87, 168/49/93$ $P_{\text{plug}} = 4.04; \tau_{\text{plug}} = 85.51$; 逆断/板间	2009-10-07/M7.8/35km 2009-10-07/M7.4/31km	390	多震型	
46	2010-02-27	36.12°S, 72.90°W	8.8	22	$P_{\text{plug}} = 19/18/116, 172/74/82$ $P_{\text{plug}} = 28.43; \tau = 60.33$; 逆断/板间	2010-02-27/M7.4/35km 2010-03-11/M7.0/18km $\Delta M = 1.4; \Delta t = 1.5 \text{ h};$ $\Delta d = 267 \text{ km}$	650	主-余型	
47	2010-10-25	-3.49°S, 100.08°E	7.8	20	$P_{\text{plug}} = 307/8/96, 130/82/89$ $P_{\text{plug}} = 37.04; \tau_{\text{plug}} = 52.95$; 逆冲/板间	2010-10-25/M6.3/26km $\Delta M = 1.6; \Delta t = 5 \text{ h};$ $\Delta d = 67 \text{ km}$	170	主-余型	

续附表 1

序号	发震日期 (年-月-日)	震中	震级 M_w	震源 深度 /km	震源机制解 走向/倾角/滑动角(°)	最大余震或第 2、3 主震 发震日期(年-月-日) /震级/震源深度	主震与最大余震 震级差 ΔM ; 时间差 Δt ; 震中距 Δd	余震区长轴 /km	序列 类型
48	2011-03-11	38.30°N, 142.37°E	9.0	29	$P_{\text{plug}} = 35.01$; $T = 54.99$; 逆断/板间	2011-03-11/M7.9/43km	$\Delta M = 1.1$; $\Delta t = 0.5\text{h}$; $\Delta d = 250\text{km}$	600	主-余型
49	2012-04-11	2.29°N, 93.08°E	8.6	20	$P_{\text{plug}} = 6.39$; $T_{\text{plug}} = 13.35$; 走滑/板内	2012-04-11/M8.2/23km		400	多震型
50	2012-10-28	52.79°N, 132.10°W	7.8	14	$P_{\text{plug}} = 20.54$; $T_{\text{plug}} = 68.56$; 逆断/板间	2012-10-28/M6.3/9km	$\Delta M = 1.5$; $\Delta t = 16\text{h}$; $\Delta d = 37\text{km}$	126	主-余型
51	2013-02-06	10.74°S, 165.14°E	8.0	28	$P_{\text{plug}} = 25$; $T_{\text{plug}} = 65$; 逆断/板间	2013-02-06/M7.1/10km 2013-02-08/M7.1/21km	$\Delta M = 0.9$; $\Delta t = 11\text{min}$, 2.5d; $\Delta d = 49$, 101km	235	主-余型
52	2014-04-01	19.64°S, 70.81°W	8.2	20	$P_{\text{plug}} = 30.47$; $T = 59.20$; 逆断/板间	2014-04-03/M7.7/22km		185	多震型
53	2015-04-25	28.14°N, 84.70°E	7.8	15	$P_{\text{plug}} = 39.03$; $T_{\text{plug}} = 50.96$; 逆断/板间	2015-05-12/M7.3/15km 2015-04-26/M6.7/23km		202	多震型
54	2015-09-16	31.57°S, 71.67°W	8.3	22	$P_{\text{plug}} = 26.80$; $T = 62.41$; 逆断/板间	2015-09-16/M7.0/28km	$\Delta M = 1.3$; $\Delta t = 24\text{min}$; $\Delta d = 25\text{km}$	315	主-余型
55	2016-03-02	4.95°S, 94.33°E	7.8	24	$P_{\text{plug}} = 2.12$; $T_{\text{plug}} = 2.12$; 走滑/板内	2016-03-02/M5.6/10km	$\Delta M = 2.2$; $\Delta t = 12\text{h}$; $\Delta d = 20\text{km}$	102	主-余型
56	2016-04-16	0.38°N, 79.92°W	7.8	21	$P_{\text{plug}} = 27/21/124$, 171/73/78 $P_{\text{plug}} = 26.75$; $T_{\text{plug}} = 60.48$; 逆断/板间	2016-05-18/M6.9/30km	$\Delta M = 0.9$; $\Delta t = 32$ 天; $\Delta d = 36\text{km}$	266	主-余型
57	2016-11-13	42.72°S, 173.06°E	7.8	22	$P_{\text{plug}} = 226/33/141$, 350/70/63 $P_{\text{plug}} = 20.53$; $T_{\text{plug}} = 56.66$; 逆断/板间	2016-11-13/M6.5/24km 2016-11-14/M6.5/9km	$\Delta M = 1.3$; $\Delta t = 30\text{min}$, 13h; $\Delta d = 69$, 20km	200	主-余型
58	2016-12-08	10.68°S, 161.33°E	7.8	40	$P_{\text{plug}} = 0.01$; $T_{\text{plug}} = 65.34$; 逆断/板间	2016-12-09/M6.9/20km	$\Delta M = 0.9$; $\Delta t = 1.08\text{d}$; $\Delta d = 24\text{km}$	220	主-余型