

陈大庆, 邵叶, 许斌斌, 等. 中国大陆最大余震的统计特征分析[J]. 华南地震, 2025, 45(3): 6-12. [CHEN Daqing, SHAO Ye, XU Binin, et al. Statistical Analysis of the Largest Aftershocks in Chinese Mainland[J]. South China journal of seismology, 2025, 45(3): 6-12]

中国大陆最大余震的统计特征分析

陈大庆, 邵叶, 许斌斌, 杨雪, 王小娜, 仲秋

(广东省地震局, 广州 510075)

摘要: 对1976年以来中国大陆134次6级以上地震的破裂类型、序列类型、主震与最大余震的震级差、时间间隔以及序列类型和主震前震中区域中小地震活动的关系等进行了统计分析, 发现90%的最大余震发生在主震后90天以内。按破裂类型划分, 各类型中主余型的占比都超过了60%, 并且相对在走滑型和正断型中占比较高, 而孤立型在走滑型中占比较低, 正断型中甚至未出现孤立型地震, 并且孤立型地震多发生在地震相对不活跃的区域, 随着主震震级的升高, 孤立型序列的数量占比显著减小。统计主震后24h内最大余震和后续最大余震的关系发现, 主震后24h内发生的最大余震越大, 则后续最大余震越小。如果24h内最大余震和主震震级差1级以内或者2.5级以上, 前者后续发生更大余震可能性比例较小为18.2%, 后者则可能性很大为89.5%。这些统计规律可以在震前、震后不同时间段对序列的最大余震做出估计。

关键词: 中国大陆; 最大余震; 序列类型; 破裂类型; 间隔时间

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)03-0006-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.03.02

Statistical Analysis of the Largest Aftershocks in Chinese Mainland

CHEN Daqing, SHAO Ye, XU Binin, YANG Xue, WANG Xiaona, ZHONG Qiu
(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on the data of 134 earthquakes with $M \geq 6.0$ in Chinese mainland since 1976, the paper presents a statistical analysis of the rupture types, sequence types, magnitude difference between the main shock and the largest aftershock, time interval, as well as the relationship between sequence types and small and medium-sized seismicity in the pre-mainshock epicentral region. It is found that 90% of the largest aftershocks occurred within 90 days after the main shock. According to the classification of rupture types, the proportion of main and after types in each type is more than 60%, and the proportion is higher in strike-slip type and normal fault type, while the proportion of isolated type is lower in strike-slip type, there is no isolated earthquake in the normal fault type. Isolated earthquakes usually occur in regions where earthquakes are relatively inactive, and with the increase of the magnitude of the main earthquake, the proportion of isolated sequences decreases significantly. Based on the

收稿日期: 2024-02-13

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515110367)

作者简介: 陈大庆(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事地震预测研究。

E-mail: gd_daqing@163.com

relationship between the largest aftershock within 24 hours after the main shock and the largest aftershock, it is found that the larger the largest aftershock within 24 hours, the smaller the subsequent largest aftershock. If the magnitude difference between the largest aftershock within 24 hours and the main shock is less than one magnitude or more than 2.5 magnitude, the probability of a subsequent larger aftershock is 18.2% for the former and 89.5% for the latter. These statistical rules can be used to estimate the largest aftershocks in different time periods before and after an earthquake

Keywords: Chinese mainland; Largest aftershock; Sequence type; Rupture type; Interval time

0 引言

对于余震序列,国内外学者进行过较多的研究,如国外有 Utsu、Lutz、Lutz、Chapman 等^[1-4],国内有周蕙兰^[5]、吴开统^[6]、蒋海昆^[7]、任雪梅^[8]等对我国的余震序列相继做了详细研究。本文对1976—2021年中国大陆发生的134个序列类型和破裂参数相对完备的6级以上地震的最大余震进行了统计研究,着重对地震的破裂类型、序列类型、主震与最大余震的震级差、时间间隔以及序列类型和震前震中区域中小地震活动的关系等进行了统计和分析,试图得到不同序列类型地震的最大余震震级、时间间隔、震后24 h内最大余震与后续最大余震以及震前震中区域中小地震活动和序列类型的统计关系,从而为强震后最大余震的预测和研究提供参考。

1 余震序列类型与资料选取

本文划分序列类型主要依据主震所释放能量占全序列所释放总能量的比例 R_E 来进行^[5]。 $R_E \geq 99.99\%$ 为孤立型, $R_E < 90\%$ 为震群型或双震型, $90\% < R_E \leq 99.99\%$ 为主余型。粗略地以序列中两次最大地震的能量代替序列总能量,可得与上述能量判据相对应的、以 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列分类的判据^[9]: $\Delta M \geq 2.5$ 为孤立型, $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$ 为主余型, $\Delta M < 0.6$ 为多震型,多震型包含了不同研究者曾提及的“双震型”及“震群型”序列, M_0 和 M_1 分别为序列主震及最大余震震级。本文收集整理了1976年至2021年中国大陆134个记录相对完备的 $M_s \geq 6.0$ 地震序列。依据上述序列类型划分标准分为:孤立型13个、主余型98个、多震型23个,分别约占9.7%、73.1%、17.2%。对比蒋海昆^[9]统计的1970年以来中国大陆 $M \geq 5.0$ 地震序列类型孤立型、主余型、多震型分别约占23%、59%、18%的

结果, $M \geq 6.0$ 地震序列孤立型中占比显著下降,多震型基本一致,主余型显著上升。这一结果也符合本文的结论,随着主震震级的升高,孤立型占比减小。

破裂类型依据震源机制解的滑动角 λ ,分为走滑型、逆冲型和正断型,统计资料来源于美国哈佛大学的全球强震矩心矩张量解(CMT):

当 $-30^\circ \leq \lambda \leq 30^\circ$ 、 $150^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$ 和 $-180^\circ \leq \lambda \leq -150^\circ$ 时为走滑型; $30^\circ < \lambda < 150^\circ$ 为逆冲型; $-150^\circ < \lambda < -30^\circ$ 为正断型。

本文采用 Keilis-Borok 和 Knopoff^[10]提出的主震震级法确定余震的时间和空间窗(记为K-K法)。由于汶川地震为单侧破裂,实际破裂长度超过300 km,因此此次地震余震空间窗范围按实际余震分布范围确定。

表1 K-K法的余震空间、时间窗
Table 1 Aftershock space and time window of K-K method

主震震级/ M	余震空间窗/km	余震时间窗/d
6.0~6.5	50	365
6.5~7.0	100	548
7.0~7.5	100	730
7.5~8.0	150	913
8.0~8.5	200	1100

2 主震震级、破裂类型和序列类型的关系

统计1976—2021年中国大陆发生的134个序列和破裂类型相对完备的6级以上地震主震震级、最大余震和破裂类型的关系,如表2和图1所示。从中可以得出以下结论:

按主震震级分6~6.5级中孤立型15个、主余型61个、多震型15个分别占14.6%、68.5%、16.8%;6.6~6.9级孤立型0个、主余型21个、多震型5个分

别占0%、80.7%、19.3%；7.0级以上孤立型0个、主余型14个、多震型4个分别占0%、77.8%、22.2%。随着主震震级的升高，孤立型地震的数量显著减小，6.6级以上没有孤立型，而主余型的占比显著增高，多震型基本维持在20%左右，但2次8级地震都是主余型。

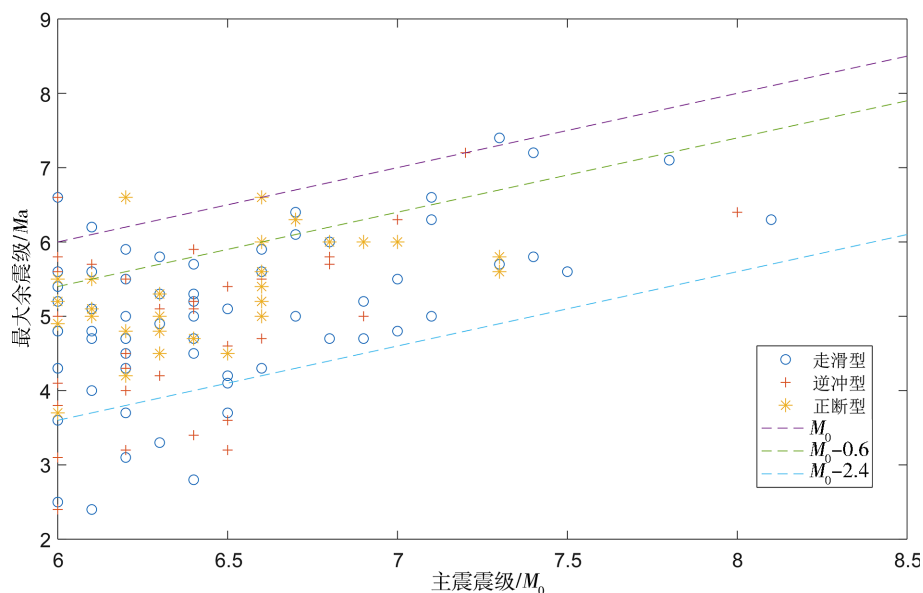
按地震破裂类型分，68个走滑型地震中孤立型7个、主余型49个、多震型12个，分别占10.3%、72.1%、17.6%；37个逆冲型地震中孤立型

6个、主余型24个、多震型7个，分别占16.2%、64.9%、18.9%；29个正断型地震中孤立型0个、主余型25个、多震型4个，分别占0%、86.2%、13.8%；各种破裂类型中主余型的占比都超过了60%，并且相对在走滑型和正断型占比较高，而孤立型在走滑型占比较低，其中正断型中未出现孤立型地震。以上统计结果和任雪梅2013年统计结果^[8]基本一致。

表2 主震震级、破裂方式和序列类型的关系统计

Table 2 Relationship between magnitude, rupture mode, and sequence type of mainshock

划分类别		序列类型(个数/比例)		
		孤立型	主余型	多震型
主震震级	6~6.5	15(14.6%)	61(68.5%)	15(16.8%)
	6.5~6.9	0(0%)	21(80%)	5(19.3%)
	≥7.0	0(0%)	14(77.8%)	4(22.2%)
破裂类型	走滑	7(10.3%)	49(72.1%)	12(17.6%)
	逆冲	6(16.2%)	24(64.9%)	7(18.9%)
	正断	0(0%)	25(86.2%)	4(13.8%)



($M_a < M_0 - 2.4$ 孤立型; $M_0 - 2.4 \leq M_a \leq M_0 - 0.6$ 主余型; $M_0 - 0.6 < M_a$ 多震型)

图1 中国大陆6级主震震级、破裂类型和最大余震的关系(1976—2021, $M \geq 6.0$)

Fig.1 Relationship between magnitude, rupture type, and the largest aftershock of $M6$ main shock in Chinese mainland (1976–2021, $M \geq 6.0$)

3 序列类型、破裂类型与最大余震间隔时间的统计关系

图2、图3、表3为各序列类型、破裂类型与最大余震和主震间隔时间的频次累积分布，震后1

h内，发生最大余震的比例为20%左右，最高的是逆冲型在30%；震后12h内发生最大余震的比例为40%左右，显著偏低的是多震型只有16%；震后一天内平均在46%，主余型偏高57%，而多震型则显著偏低只有19%。震后3天平均在50%左右，多震型只有19%，到震后90天，各类型都基本接近

90%。说明绝大部分最大余震发生在震后90天内。这一统计结果与刘蒲雄等“绝大多数序列的最大余震一般发生在主震后3个月内”这一认识相吻合。

多震型在震后早期发生最大余震的比例低于平均值,相反主余型高于平均值。

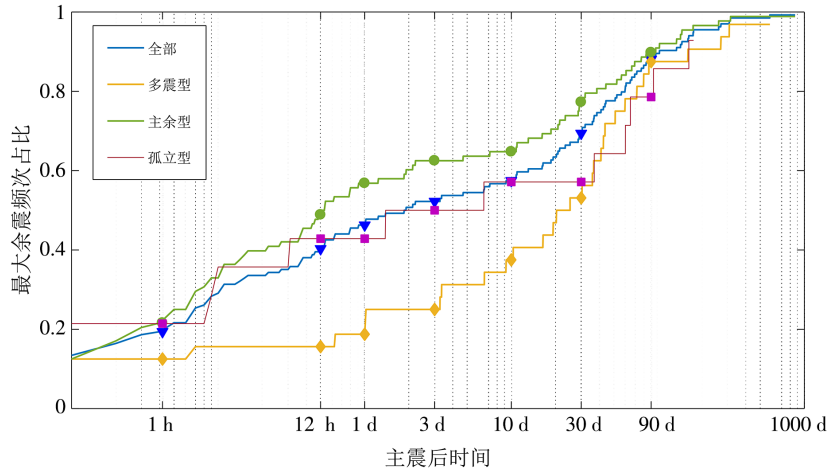


图2 中国大陆6级地震序列类型最大余震间隔时间累积占比(1976—2021, $M \geq 6.0$)

Fig.2 Cumulative proportion of the largest aftershock interval time of $M6$ earthquake sequence type in Chinese mainland (1976-2021, $M \geq 6.0$)

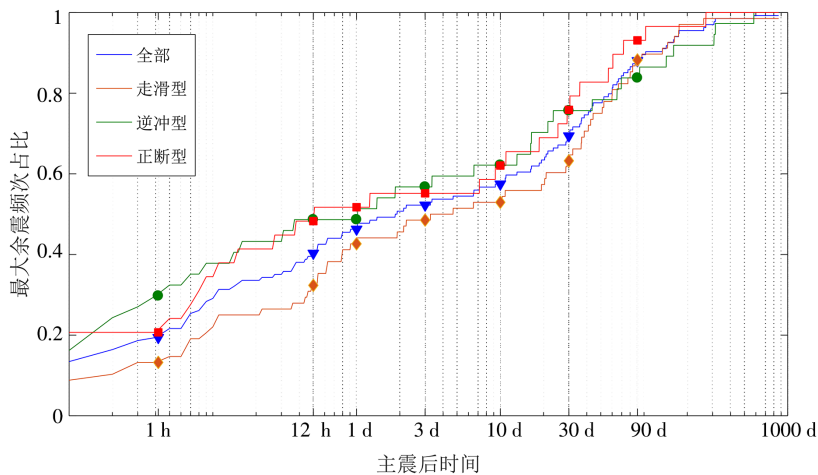


图3 中国大陆6级地震破裂类型最大余震间隔时间累积占比(1976—2021, $M \geq 6.0$)

Fig.3 Cumulative proportion of the largest aftershock interval time of $M6$ earthquake rupture type in Chinese mainland (1976-2021, $M \geq 6.0$)

表3 中国大陆6级地震序列、破裂类型最大余震间隔时间累积占比 (1976—2021, $M \geq 6.0$)

Table 3 Cumulative proportion of the largest aftershock interval time of $M6$ earthquake sequence type and rupture type in Chinese mainland (1976-2021, $M \geq 6.0$)

间隔时间	全部	多震	主余	孤立	走滑	逆冲	正断
1 h	0.19	0.13	0.22	0.21	0.13	0.30	0.21
12 h	0.40	0.16	0.49	0.43	0.32	0.49	0.48
1 d	0.46	0.19	0.57	0.43	0.43	0.49	0.52
3 d	0.52	0.25	0.63	0.50	0.49	0.57	0.55
10 d	0.57	0.38	0.65	0.57	0.53	0.62	0.62
30 d	0.69	0.53	0.77	0.57	0.63	0.77	0.76
90 d	0.88	0.88	0.90	0.79	0.88	0.84	0.93

4 主震后 24 h 最大余震和后续最大余震的关系

图4统计了主震后 24 h 内最大余震和后续最大余震的关系,其中 M_0 为主震震级、 M_1 为主震后 24 h 内最大余震震级、 $\text{MAX}(M_2: M_{\text{end}})$ 为主震 24 h 后至序列结束最大余震震级。从图中可以看到 $M_1 - \text{MAX}(M_2: M_{\text{end}})$ 和 $M_0 - M_1$ 定性负相关,即相对主震震级,其 24 h 内发生的最大余震越大,则后续

最大余震越小。反之,24 h 内发生的最大余震越小,则后续可能发生的最大余震越大。当 $M_0 - M_1 \leq 1$, 即 24 h 内发生了只比主震震级小 1 级以内的强余震,则后续再发生更大强余震的可能性很小,只占 18.2% (图中黄色区域)。当 $M_0 - M_1 \geq 2.5$ 的时候,即 24 h 内发生的最强余震比主震小 2.5 级以上则后续发生更大余震的可能性很大,占 89.5% (图中绿色区域)。以上统计特征可以在主震后 24 h 内根据已经发生的最强余震对后续余震做出估计。

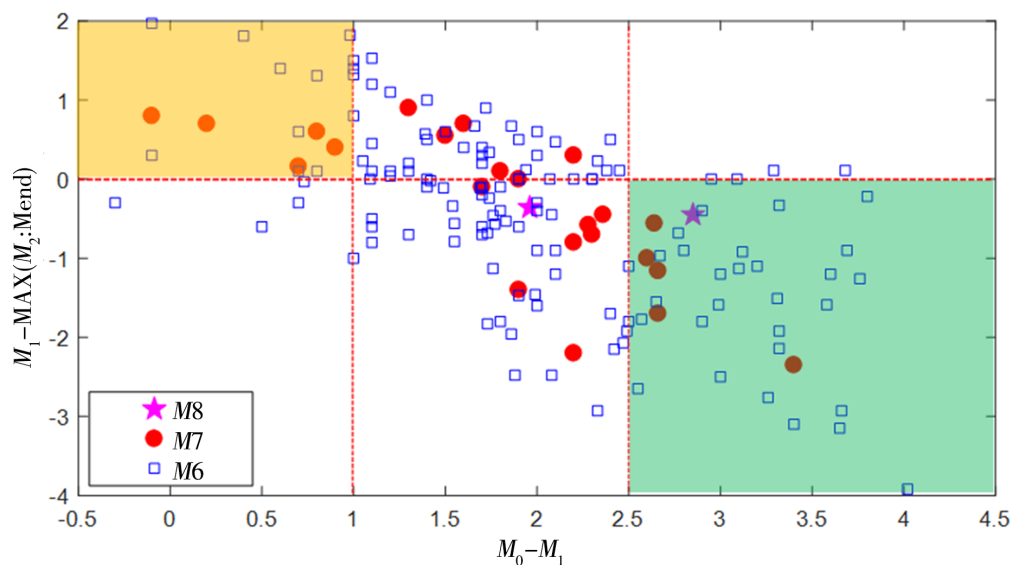


图4 主震后 24 h 内最大余震和后续最大余震的关系(1976—2021, $M \geq 6.0$)

Fig.4 Relationship between the largest aftershock within 24 hours after the main shock and the subsequent largest aftershock (1976—2021, $M \geq 6.0$)

5 序列类型与震前震中区中小地震的统计关系

图5为序列类型和主震前区域中小地震活动的统计关系图,从中可以看到主震 100 km 范围内 2 级以上地震频次,在震前 1 年时间内相对震前 5~2 年,13 次孤立型地震只有 3 次升高,占 23.1%,并且当频次比高于 2 的时候后续无孤立型地震发生。

而 98 次主余型中升高的有 53 次占 54.1%, 23 次多震型中有 13 次,占 56.5%。说明孤立型震前 1 年左右中期的时间震中区中小地震不活跃。图 6 为各序列类型地震震前 100 km 范围内 2 级地震频次双月频次平均值,多震型高于主余型,最低的是孤立型。这也说明孤立型多发生在中小地震活动相对不太活跃的地区。在震前 6 个月左右的时间,主余型和震群型有显著上升,而孤立型无明显变化。

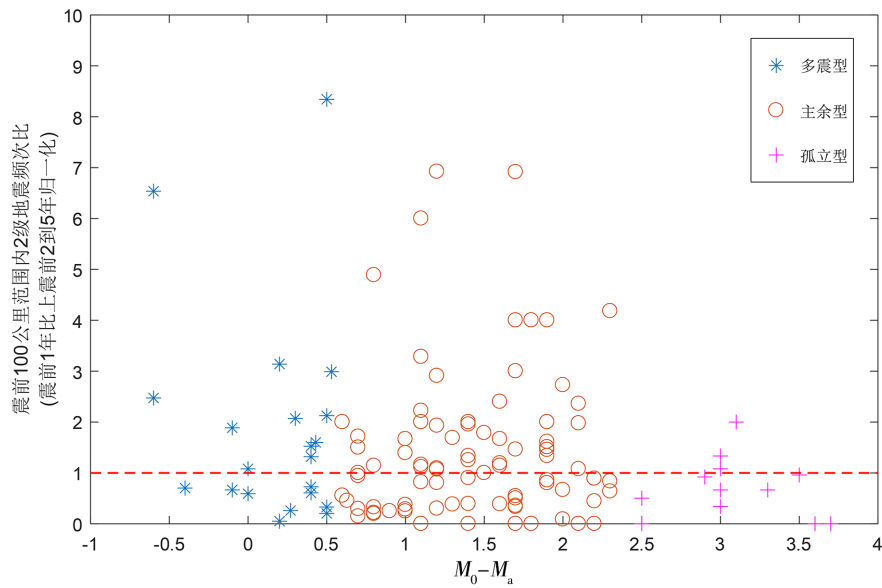


图5 震前震中区域地震活动与序列类型的统计关系(1976—2021, $M \geq 6.0$)

Fig.5 Statistical relationship between seismicity in epicentral region and sequence type before earthquake (1976–2021, $M \geq 6.0$)

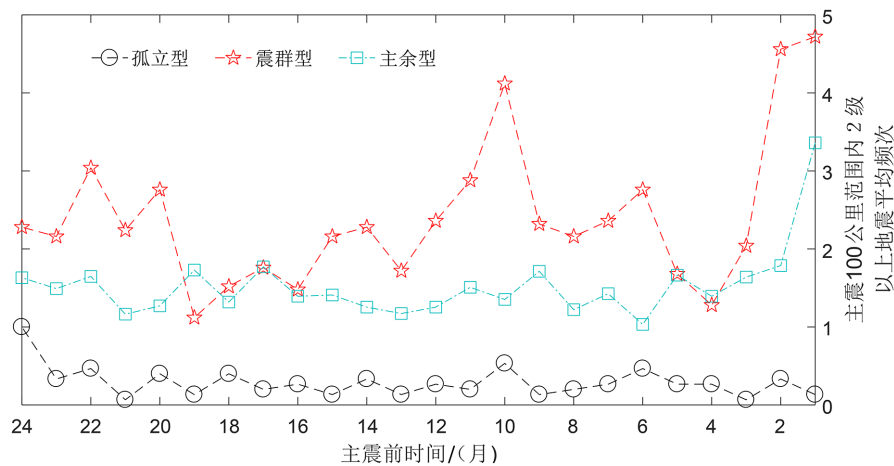


图6 中国大陆6级地震各序列类型震前中小地震活动频次

Fig.6 Frequency of seismicity of moderate and small earthquakes of each sequence type before $M6$ earthquakes in Chinese mainland

6 结论与讨论

通过对中国大陆134次6级地震的破裂类型、序列类型、主震与最大余震的震级差、时间间隔以及序列类型和震前震中区域中小地震活动的关系等的统计分析,可以得到以下几点认识:

(1)中国大陆6级以上地震中孤立型、主余型、多震型,分别约占9.7%、73.1%、17.2%。随着主震震级的升高,孤立型地震的数量占比显著减小,6.6级以上没有孤立型,相反主余型的占比显著增高,而多震型基本维持在20%左右。

(2)按地震破裂类型划分,各类型中主余型的占比都超过了60%,走滑型和正断型占比更高,而

孤立型的在走滑型中占比较低,正断型中甚至未出现孤立型地震。

(3)统计最大余震和主震的时间间隔,90%左右的最大余震出现在震后90天内。按序列类型划分在震后1天差距较大,平均有46%的最大余震发生在这个时间内,主余型偏高57%,而多震型则显著偏低只有19%。多震型在震后早期发生最大余震的比例低于平均值,相反主余型高于平均值。

(4)主震后24 h内发生的最大余震越大,则后续最大余震越小。反之,24 h内发生的最大余震越小,则后续可能发生的最大余震越大。当24 h内发生了只比主震震级小1级以内的强余震,则后续再发生更大强余震的占比很小,只占18.2%。当24小时内发生的最大余震比主震小2.5级以上的时候,

后续发生更大余震的占89.5%。

(5)统计各类型主震前区域中小地震活动频次,孤立型震前1年左右中期的时间相对不活跃,并且当频次比高于2的时候后续无孤立型地震发生。这也说明孤立型多发生在中小地震活动相对不太活跃的地区。

以上统计规律可以在震前、震后不同时间段对序列的最大余震做出估计。

参考文献

- [1] Ustu T A. A statistical study on the occurrence of aftershocks [J]. Geophy Mag, 1961(30):521-605.
- [2] Lutz T M. An analysis of the orientation of large-scale crustal structures: A statistical approach based on area distributions of point like features[J]. J Geophys Res, 1986, 91(B1):421-434.
- [3] Lutz T M, Gutmann J T. An improved method for determining and characterizing alignments of point like features and its implications for the Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico[J]. J Geophys Res, 1995, 100(B9):176599-17670.
- [4] Chapman M C, Powell C A, Vlahovic G, et al. A statistical analysis of earthquake focal mechanisms and epicenter location the eastern Tennessee seismic zone[J]. Bull Seism Soc Am, 1997, 87(6):1522-1536.
- [5] 周蕙兰,房桂荣,章爱娣,等.余震序列的持续时间[J].地震学报, 1982, 4(1):45-54.
- [6] 吴开统,焦远碧,吕培苓,等.地震序列概论[M].北京:北京大学出版社, 1990.
- [7] 蒋海昆,曲延军,李永莉,等.中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J].地球物理学报, 2006, 49(4):1110-1117.
- [8] 任雪梅,谭俊林,马禾青,等.中国大陆及边邻地区6级以上地震序列的最大余震统计特征[J].中国地震, 2013, 29(4):480-488.
- [9] 蒋海昆,李永莉,曲延军,等.中国大陆中强地震序列类型空间分布特征[J].地震学报, 2006, 28(4):389-398.
- [10] Keilis-Borok V I, Knopof L, Rotvain I M. Bursts of aftershock of strong earthquakes[J]. Nature, 1980 (238):259-263.