

罗国富,盛菊琴,马禾青,等.西北地区东部 5 级以上地震序列统计研究[J].地震工程学报,2017,39(3):0564-0570.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0564

LUO Guo-fu, SHENG Ju-qin, MA He-qing, et al. Statistical Study of Earthquake Sequences of $M_s \geq 5.0$ in the East of Northwest China[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 0564-0570. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0564

西北地区东部 5 级以上地震序列统计研究^①

罗国富¹, 盛菊琴¹, 马禾青¹, 王马思言²

(1. 宁夏地震局, 宁夏 银川 750001; 2. 宁夏银川一中, 宁夏 银川 750001)

摘要:对 1970 年 1 月至 2012 年 12 月西北地区东部 51 次 5 级以上地震序列进行统计研究, 其中走滑型占 58.8%, 逆断和逆冲型占 19.6%, 正断型占 11.8%。在相同破裂类型和序列类型下, 主震与最大余震的震级关系线性较好, 主震与最大余震时间间隔之间的线性关系较差。走滑型和逆断型地震的 60% 以上主震后 1 天内发生最大余震, 正断型地震中 16.7% 主震后 1 天内发生最大余震。若序列不属双震多震类型, 分析最大余震时, 可利用经验公式 $\Delta M = 1.54 \times M - 6.53$ 。

关键词:西北地区东部; 5 级以上地震; 序列; 统计研究

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)03-0564-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0564

Statistical Study of Earthquake Sequences of $M_s \geq 5.0$ in the East of Northwest China

LUO Guo-fu¹, SHENG Ju-qin¹, MA He-qing¹, WANG Ma-si-yan²

(1. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China;

2. The First Senior High School of Yinchuan in Ningxia, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: In this study, we statistically analyzed 51 earthquake sequences with magnitudes ≥ 5.0 that occurred in eastern Northwest China from Jan. 1970 to Dec. 2012. Of these, the strike-slip type occurred 30 times, representing 58.8% of the total. The overlap and inverse-impulse type occurred ten times, representing 19.6%, and the normal fault type occurred six times, representing 11.8%. With respect to earthquake rupture type, the mainshock-aftershock type represented more than 60% of the rupture types, followed by the isolated type, and lastly the double shock or multiple shock type. With respect to normal-fault-type earthquakes, the mainshock-aftershock type had the highest proportion at 50%. The next highest proportion was the double shock or multiple shock type at 33.3%. The isolated type was least frequent. For earthquakes of the same rupture and sequences types, a linear relation between the main shock magnitude and the greatest aftershock magnitude was most common. Also, the relation was weak between the main shock occurrence time and the greatest aftershock occurrence time. More than 60% of the strike-slip and inverse-impulse types experienced the greatest aftershocks one day after the main shock but only 16.7% of the normal fault type experienced the greatest aftershocks one day after the main shock.

① 收稿日期: 2016-04-26

基金项目: 宁夏回族自治区科技攻关计划项目(102164170)

作者简介: 罗国富(1978—), 男, 山西沁源人, 高级工程师, 主要从事地震预报及相关研究。E-mail: luoguofu_05@163.com。

If a sequence cannot be categorized as a double shock or multiple shock sequence, the empirical equation $\Delta M=1.54\times M-6.53$ can be used to analyze the greatest aftershock.

Key words: the East Part of North-West China; earthquake sequences of magnitude ≥ 5.0 ; sequence; statistical study

0 引言

本文主要针对西北地区东部 5 级以上地震序列进行研究。中强地震序列特征及序列性质的判定研究属地震短期预测研究的重要组成部分,是对地震趋势进行判定的重要依据。我国对序列性质判定指标及方法开展了广泛的统计研究,在中强地震序列趋势判定、强余震预测等^[1-3]方面发挥了积极作用。

1 西北地区东部 5 级以上地震序列破裂类型分类研究

1.1 资料选取和统计方法

1970 年 1 月至 2012 年 12 月西北地区东部(33.0°~43.0°N,97.0°~110.0°E)发生 5 级以上地震

共 58 次,其中 7 次地震为双震类型,双震地震按照一次地震事件处理。因此本文统计的西北地区东部 5 级以上地震事件共 51 次(组),其中 39 次为 5.0~5.9 级地震,11 次为 6.0~6.9 级地震,1 次 7.0 级地震。对这些地震的破裂类型进行收集、整理和统计(表 1),统计资料主要来源于《中国震例》陈琪福等^[4-7]、张肇诚等^[8-12]和中国台网中心提供的资料。

1.2 序列分类

(1) 破裂类型分类

西北地区东部 1970 年以来发生的 51 次(组) 5 级以上地震中,走滑型地震 30 次,占统计地震的 58.8%;逆断和逆冲型地震 10 次,占 19.6%;正断型地震 6 次,占 11.8%;另外有 5 次地震没有破裂类型资料,占 9.8%(表 2)。

表 1 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震破裂类型、序列类型和最大余震参数

Table 1 The rupture type, sequence type and maximum aftershock parameter of the $M_s\geq 5$ earthquakes in the northwest of china since 1970

序号	西北地区中强以上地震(主震)					破裂类型	最大余震				序列类型
	发震时间	纬度 / (°)	经度 / (°)	震级 / M_s	地点		发震时间	震级 / M_s	与主震 震级差	与主震 间隔/d	
1	1970-12-03	35.85	105.55	5.5	宁夏西吉	左旋走滑	1970-12-15	1.6	3.9	12	孤立型
2	1971-03-24	35.50	98.08	6.3	青海玛多北	逆断	1971-03-24	3.2	3.1	0	孤立型
3	1971-06-28	37.75	106.18	5.1	宁夏吴忠	左旋逆断	1971-06-28	3.9	1.2	0	主余型
4	1974-09-23	33.80	102.60	5.6	四川若尔盖	走滑	1974-09-23	2.3	3.3	0	孤立型
5	1975-01-04	38.80	97.61	5.3	青海哈拉海	*	1975-01-05	3.7	1.6	1	主余型
6	1976-09-23	39.90	106.40	6.2	内蒙古巴音木仁	走滑	1976-09-23	4.5	1.7	0	主余型
7	1977-12-16	33.30	97.30	5.3	青海玉树	*	1977-12-16	3.4	1.9	0	主余型
8	1978-02-21	34.00	101.10	5.1	青海久治	*	1978-02-22	2.4	2.7	1	孤立型
9	1979-08-25	41.23	108.12	6.0	内蒙古五原	走滑	1979-08-25	5.1	0.9	0	震群型
10	1980-04-18	38.00	98.83	5.2	青海天俊	走滑	1980-04-25	2.8	2.4	7	震群型
	1980-04-24	38.36	98.73	5.0							
11	1982-04-14	36.75	105.50	5.5	宁夏海原	走滑	1982-04-14	2.6	2.9	0	孤立型
12	1983-01-17	40.37	107.02	5.1	内蒙古磴口	逆走滑	1983-03-11	3.7	1.4	53	孤立型
13	1984-01-06	37.92	102.17	5.3	甘肃天祝	逆断	1984-04-06	3.9	1.3	90	主余型
14	1984-02-17	37.63	100.67	5.1	青海祁连西南	正断	1984-02-17	3.1	2.0	0	主余型
15	1984-11-23	38.07	106.22	5.3	宁夏灵武	走滑	1985-02-18	3.9	1.4	86	主余型
16	1986-08-26	37.70	101.57	6.5	青海门源	正断	1986-09-17	5.4	0.9	22	主余型
17	1987-01-08	34.17	103.22	5.8	甘肃迭部	逆断—走滑	1987-03-03	4.1	1.7	54	主余型
18	1987-08-10	38.05	106.27	5.5	宁夏灵武	逆断—走滑	1987-08-10	4.4	1.1	0	主余型
19	1988-01-04	38.07	106.27	5.5	宁夏灵武	正断	1988-01-08	4.3	1.2	4	震群型
	1988-01-10	38.05	106.26	5.0		走滑	1988-04-12	4.3			
20	1988-11-22	38.58	99.52	5.7	甘肃肃南	走滑	1988-11-22	3.3	2.4	0	震群型
	1988-12-04	38.56	99.51	5.1							
21	1989-11-02	35.90	106.30	5.0	宁夏固原	逆走滑	1989-11-02	2.4	2.6	0	孤立型
22	1990-04-26	36.12	100.12	7.0	青海共和	倾滑	1990-05-16	5.4	1.6	21	主余型
23	1990-10-20	37.12	103.58	6.2	甘肃景泰	走滑	1990-10-20	4.2	2.0	0	主余型

续表 1

序号	西北地区中强以上地震(主震)					破裂类型	最大余震				序列类型
	发震时间	纬度 /(°)	经度 /(°)	震级 /M _s	地点		发震时间	震级 /M _s	与主震 震级差	与主震 间隔/d	
24	1991-01-02	38.20	99.90	5.1	青海祁连	正走滑	1991-01-09	2.8	2.3	7	主余型
25	1991-01-13	40.55	106.05	5.3	内蒙古阿左旗	走滑	1991-02-07	3.6	1.7	25	主余型
26	1991-06-16	38.93	105.68	5.3	内蒙古阿左旗	正走滑	1991-06-16	2.1	3.2	0	孤立型
27	1991-09-14	40.18	105.07	5.0	内蒙古阿左旗	走滑	1991-09-15	3.1	1.9	1	主余型
28	1991-10-01	37.78	101.37	5.2	青海门源	正断	1991-10-06	3.5	1.7	5	主余型
29	1992-01-12	39.75	98.32	5.4	甘肃嘉峪关	正断	1992-03-20	3.6	1.8	68	孤立型
30	1992-06-21	38.55	99.62	5.0	青海祁连西北	逆断	1992-09-01	3.4	1.6	70	孤立型
31	1992-11-30	33.20	98.00	5.1	四川石渠	*	*	*	2.9	0	孤立型
32	1993-10-26	38.47	98.62	6.0	青海祁连	逆断	1993-10-26	3.1	3.5	44	孤立型
33	1994-01-03	36.08	100.14	6.0	青海共和	逆断	1994-02-16	5.8	2.6	0	震群型
34	1995-07-22	36.37	103.25	5.8	甘肃永登	走滑	1995-07-22	3.2	0.7	2	主余型
35	1995-12-18	34.60	97.30	6.2	青海玛多	正断	1995-12-20	5.5	2.4	0	主余型
36	1996-05-03	40.80	109.60	6.4	内蒙古包头	走滑	1996-05-10	4.0	2.7	7	主余型
37	1996-06-01	37.28	102.75	5.4	甘肃天祝	逆走滑	1996-06-08	2.7	2.1	2	主余型
38	1996-10-09	34.70	98.10	5.0	青海玛多	*	1996-10-11	2.9	0.8	5	孤立型
39	1997-10-21	41.15	107.37	5.0	内蒙乌拉特后旗	逆走滑	1997-10-26	4.2	1.9	0	主余型
40	1999-09-27	34.58	101.47	5.1	青海河南	逆断	1999-09-27	3.2	0.7	12	主余型
41	1999-11-26	34.60	99.90	5.0	青海玛沁	正走滑	1999-12-08	4.3	3.4	3	主余型
42	2000-06-06	37.13	103.92	5.9	甘肃景泰	逆走滑	2000-06-09	2.5	1.4	0	主余型
43	2000-09-12	35.57	99.62	6.6	青海兴海	走滑	2000-09-12	5.2	2.0	7	主余型
44	2001-07-11	39.20	98.00	5.3	甘肃肃南	逆断	2001-07-18	3.3	1.7	0	主余型
45	2002-12-14	39.80	97.30	5.9	甘肃玉门	逆断	2002-12-14	4.3	2.0	0	主余型
46	2003-10-25	38.35	100.92	6.1	甘肃民乐	走滑	2003-10-25	4.1	2.0	0	震群型
		38.40	101.10	5.8							
47	2003-11-13	34.75	103.92	5.2	甘肃岷县	逆断	2003-11-13	3.2	3.0	3	主余型
48	2004-09-07	34.70	103.90	5.0	甘肃岷县	走滑	2004-09-10	2.0	1.6	0	主余型
49	2006-06-21	33.10	105.00	5.0	甘肃文县	走滑	2006-06-21	3.4	1.0	22	主余型
50	2008-03-30	38.00	102.00	5.0	甘肃肃南	走滑	2008-04-21	4.0	1.6	0	主余型
51	2012-05-03	40.60	98.60	5.4	甘肃金塔	走滑兼逆	2012-05-03	3.8			主余型

注：* 表示没有资料,或者资料不全、缺失的,无法查询。表中的主震若是双震多震类型,主要指与第一次主震与最大强余震间震级差和时间间隔。

表 2 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震的破裂类型分类

Table 2 The statistic of rupture type of the $M_s \geq 5$ earthquakes in the east of Noth west China since 1970

地震总数	地震破裂类型	地震个数	所占百分比/%
51 次	走滑型	30	58.8
	逆断和逆冲型	10	19.6
	正断型	6	11.8
	无资料	5	9.8

(2) 不同破裂类型的地震序列类型

本工作弱震资料取自中国地震台网中心提供的中国大陆弱地震目录 EQ09,余震震级均换算成 M_s 震级。

根据震后短期阶段震情判定的实际需要,依据震级差将地震类型划分为孤立型、主余型及震群型 3 类,统一以序列主震 M_0 与 3 个月内最大余震 M_1 之间的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列类型划分,划分标准见文献[13]。

表 1 给出了西北地区东部 5 级以上地震后续最大余震、最大余震与主震震级差和时间间隔等参数及地震序列类型判定结果,不同破裂类型的地震中不同序列类型地震占同一破裂类型的百分比见表 3。

由表 3 可知,不同破裂类型的地震中,主余型占总数 60%以上,其次是孤立型,双震或者多震型占的比例最小。但是正断型的地震中,主余型占 50%,比例最高,双震或多震型其次,约为 33.3%,孤立型最小。

1.3 最大强余震发生时间、与主震震级差等统计研究

针对表 1 中西北地区东部 1970 年以来的 5 级以上地震的三种破裂类型,分别统计它们的这 3 类地震最大余震与主震震级差、时间间隔的关系,为今后研究区域 5 级以上地震后最大余震强度和发生时间判定提供依据。

表 3 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震的破裂类型和序列分类

Table 3 Rupture type and sequence classification of the $M_s \geq 5$ earthquakes in the northwest of China since 1970

地震破裂类型	地震个数	序列类型	地震个数	所占百分比/%
走滑	30	主余型	21	70
		双震型	3	10
		孤立型	6	20
逆断和逆冲	10	主余型	6	60
		双震型	1	10
		孤立型	3	30
正断	6	主余型	3	50
		双震型	2	33.3
		孤立型	1	16.7
无资料	5	主余型	3	60
		双震型	0	0
		孤立型	2	40

注:双震型包含多震型。

1.3.1 研究资料

依据表 1 中统计的地震破裂类型,若是双震或者多震型的地震以最先发生的主震为统计对象,统计最大余震与主震的时间间隔和震级差。

1.3.2 研究方法

将主震震级与余震震级、余震时间间隔都视为随机量,依据多元分析中的主分量方法,针对随机量分别作二元分析。研究方法见文献[14],在此不作详细介绍。

1.3.3 计算结果

(1) 走滑型地震

根据表 1 中的主震和最大余震震级数据,应用二元分析方法,得出主震震级与最大余震震级的经验关系式为

$$M_1 = 1.81 \times M - 6.60$$

其中最大余震 M_1 与主震震级 M 的标准差为 1.40 和 1.04 级。

图 1 表明走滑型地震主震震级与最大余震震级正相关,二者之间的线性关系较好,震级差的均值为 1.5 级,基本符合最大余震震级一般比主震小 1.2 级的巴特定律^[15]。

根据表 1 中的主震与最大余震时间间隔数据,应用二元分析方法,得出主震震级与最大余震时间间隔的经验关系式中 M 和 T 之间的线性关系不好,经验关系式的可靠性较差。主要原因是约 53.5% 的走滑型地震主震后 1 天内就发生最大余震,约 60.7% 的地震 3 天内发生最大余震,约 75% 的地震 7 天内发生最大余震,15 天内、1 月内和 3 月

内分别有 82.1%、89.2% 和 100% 的地震发生最大余震,无明显线性关系,只具有一定统计关系。

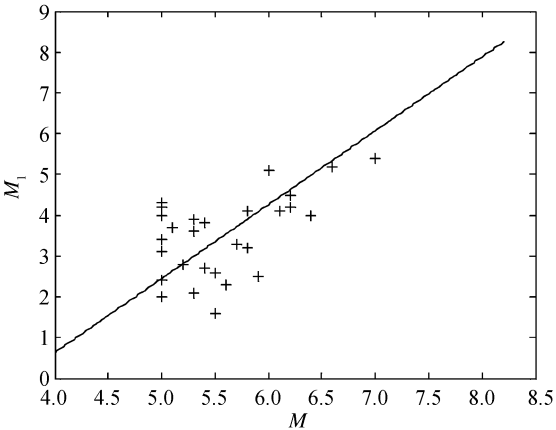


图 1 1970 年以来西北地区东部走滑型地震与最大余震震级关系图

Fig.1 Relationship between the strike slip type earthquake and the largest aftershock magnitude since 1970 in the east of Northwest China

(2) 逆断型地震

由于逆断型地震样本量仅为 10 个,得不到主震与最大余震震级、最大余震时间间隔之间的关系,在此不进行二元分析。

逆断型地震约 60% 的地震主震后 1 天内和 3 天内发生最大余震,约 70% 的地震 7 天内发生最大余震,15 天内、1 月内和 3 月内分别有 70%、70% 和 100% 的地震发生最大余震。

(3) 正断型地震

正断型地震虽然样本量很少,但仍可以看出 M 与 M_1 、最大余震时间间隔之间呈一定的线性关系(图 2)。

正断型地震约 16.7% 的地震主震后 1 天内发生最大余震,约 33.3% 的地震 3 天内发生最大余震,约 66.7% 的地震 7 天内发生最大余震,15 天内、1 月内和 3 月内分别有 66.7%、83.3% 和 100% 的地震发生最大余震,明显呈线性关系。

西北地区东部 1970 年以来 5 级以上地震序列最大余震在主震后的发生情况如表 4。

从表 4 可以看出,主震后 7 天内,66.7% 以上的地震已经发生最大余震,不论何种类型,最大余震发生在主震后 7 天内的比例为 66.7%~75%。因此今后西北地区东部 5 级以上地震后,最大余震的盲估一般是 7 天内,对于特殊地区要根据该地区的历史地震,以及活动构造和主震前后序列的活动特征,作出符合实际的最大余震预测。

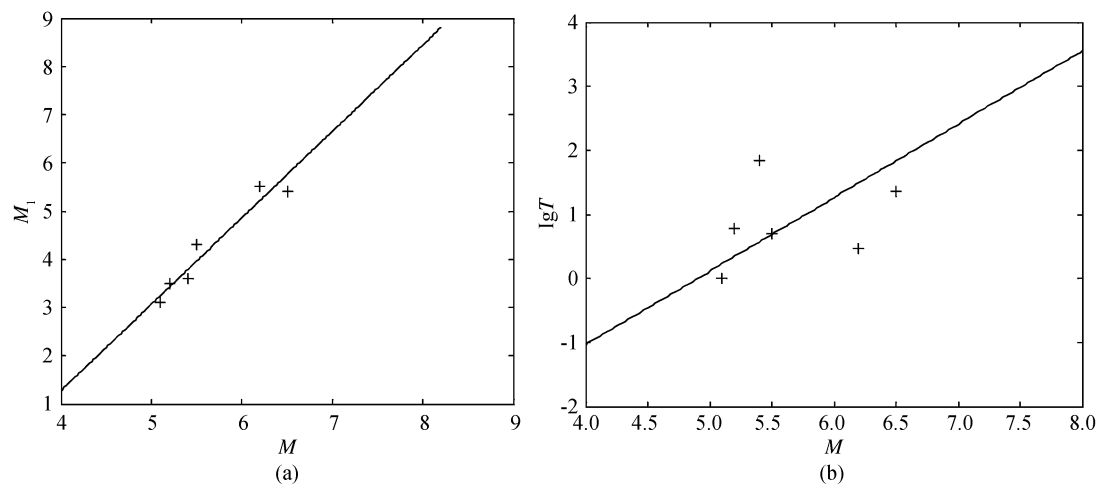


图 2 1970 年以来西北地区东部正断型地震与最大余震震级、最大余震时间间隔关系图

Fig.2 The largest aftershock magnitude and its interval of the Normal fault Earthquake type in the east of Northwest China since 1970

表 4 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震的最大余震与主震时间间隔

Table 4 The largest aftershock and its interval of the $M_s \geq 5$ earthquake in the east of Northwest China since 1970

地震破裂类型	序列中最大余震与主震不同时间间隔 t 所占百分比/%					
	$t < 1$	$t < 3$	$t < 7$	$t < 15$	$t < 31$	$t < 90$
走滑	53.5	60.7	75	82.1	89.2	100
逆断	60	60	70	70	70	100
正断	16.7	33.3	66.7	66.7	83.3	100

2 西北地区东部 5 级以上地震序列的分类研究

据蒋海昆等^[13]的研究结果:中国大陆 6 级以上地震序列属于主余型的自然概率较大(~61%),其次为震群型(~22%),孤立型的自然概率最小(~17%)。由表 1 得出,西北地区东部 1970 年以来发生的 51 次 5 级以上地震中,主余型 32 次,占总数的 63%,与中国大陆的比例基本相同;震群型(多为双震型)6 次,占总数的 12%,远小于中国大陆的比例;孤立型 13 次,占总数的 25%,明显大于的比例。该结果与杨立明等^[16]对祁连山地震带 5 级以上地震序列的研究结果相似,即孤立型所占的比例明显高于中国大陆,震群型的比例低于中国大陆。

西北地区东部震群型地震序列比例明显低于中国大陆和孤立型地震序列的比例明显高于中国大陆的原因,其机制有待进一步研究。

3 最大余震统计分析

3.1 最大余震震级统计分析

根据表 1 中的主震和最大余震震级数据,应用二元分析方法,得出主震震级与最大余震震级差的经验关系式为:

$$\Delta M = 1.54 \times M - 6.53$$

其中最大余震震级差 ΔM 与主震震级 M 的标准差分别为 1.24 和 1.00 级。

图 3 表明主震震级和最大余震震级差正相关,二者之间的线性关系较好,但当主震震级 M 在 5~5.8 级时,震级差 ΔM 的修正值为 +1.4 级;当主震震级 M 在 5.9~6.1 级时,计算出的震级差 ΔM 与真实值接近,没有修正值;当主震震级 M 在 6.0 级以上时,震级差 ΔM 的修正值为 -1.5 级,该分段修正值较好地符合最大余震震级一般比主震小 1.2 级的巴特定律^[15]。

3.2 最大余震时间间隔统计分析

根据表 1 中的主震与最大余震时间间隔数据,应用二元分析方法,得出主震震级与最大余震时间间隔的经验关系式为:

$$\lg T = 1.07 \times M - 4.71$$

其中 M 和 T 的标准差分别为 1.0 级和 10.8 天,从图 4 可以看出, $\lg T$ 和 M 之间符合一定的线性关系,但经验关系式的标准差较大。

分析标准差较大的主要原因是主震后 1 天内约 23 次、占总数 46% 的地震发生最大余震;主震后 3 天内约 30 次、占总数 60% 的地震发生最大余震;主

震后 7 天内约 37 次、占总数 74% 的地震发生最大余震;15 天内、1 月内和 3 月内分别有 78%(39 次)、84%(42 次)和 100%(50 次)的地震发生最大余震,因此存在一定的线性关系(表 5)。

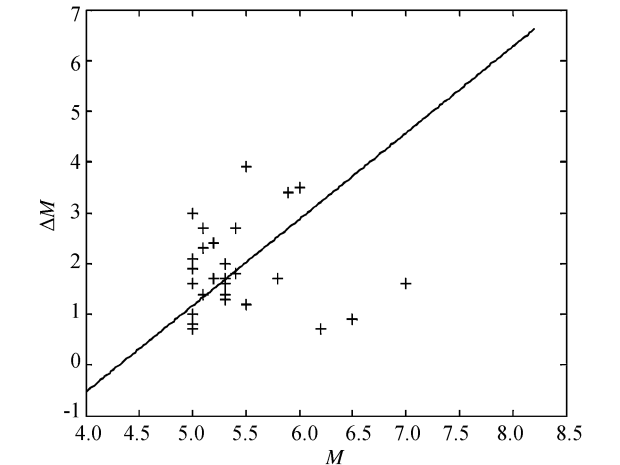


图 3 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震与最大余震震级差关系图

Fig.3 Relationship between the magnitude of the $M_s \geq 5$ earthquake and the largest aftershock in the east of Northwest China since 1970

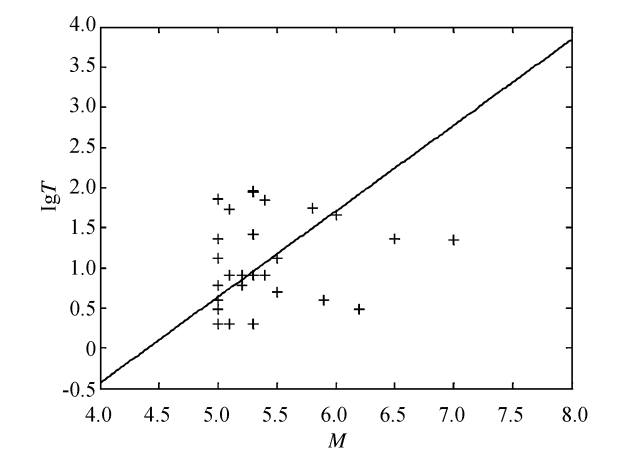


图 4 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震与最大余震时间间隔关系图

Fig.4 Relationship between the magnitude of the $M_s \geq 5$ earthquake and the largest aftershock time interval in the east of Northwest China since 1970

表 5 1970 年以来西北地区东部 5.0 级以上地震的最大余震与主震时间间隔

Table 5 The largest aftershock and its interval of the $M_s \geq 5$ Earthquake in the east of Northwest region in 1970

西北地区 5 以上	序列中最大余震与主震不同时间间隔 t 所占百分比/%					
	$t < 1$	$t < 3$	$t < 7$	$t < 15$	$t < 31$	$t < 90$
主震	46	60	74	78	84	100

3.3 典型震例检验

(1) 1989 年 11 月 2 日宁夏固原 5.0 级地震

1989 年 11 月 2 日 15 时 22 分宁夏固原发生一次 5.0 级地震,震中 50 km 范围内历史上曾发生过 1622 年固原 7 级地震、1970 年西吉 5.5 级地震,1920 年海原 8.6 级地震后的 3 次余震也分布在该区域,分别是 1921 年 1 月固原 5.5 级、1921 年 4 月固原 6.5 级和 1923 年 9 月固原 5.0 级地震。这些主震和强余震往往以主余型和孤立型发生,因此初步盲估本次地震为主余型和孤立型的可能性较大。

根据得到的经验关系公式 $\Delta M = 1.54 \times M - 6.53$,可以得出震级差 ΔM 为 1.2 级,修正值为 1.4 级,震级 ΔM 共为 2.6 级,因此最大余震为 $5 - 2.6 = 2.4$ 级。

由最大震级预测的结果,该地震可能为孤立型。根据上述统计结果,当天发生最大余震的约占西北地区东部 5 级以上地震的 46%,如果统计宁夏境内 5 级以上地震,当天发生最大余震的约为 59%,因此估计当天就会发生。

再根据上述主震和时间间隔的经验式 $\lg T =$

$1.07 \times M - 4.71$,当 $M = 5$ 级时计算出时间间隔 $T = 4$ 天,误差 ± 2 天。

1989 年 11 月 2 日 15 时 22 分发生主震 5.0 级地震,当日的 15 时 29 分就发生最大余震 2.4 级地震,并且余震不发育,主要以 1.5 级左右地震为主,1 个月内余震基本结束。实际最大余震和本节的预测基本一致,通过检验。

(2) 2000 年 6 月 6 日甘肃景泰 5.9 级地震

2000 年 6 月 6 日 18 时 59 分甘肃景泰发生一次 5.9 级地震,震中 50 km 范围内历史上曾发生过 1888 年景泰 6.2 级地震,1921 年景泰 5.5 级和 5.0 级地震,1959 年景泰 5.2 级以及 1990 年景泰 6.2 级地震。这些地震多数以主余型和孤立型发生,因此初步盲估本次地震为主余型和孤立型的可能性较大。

根据得到的经验关系式 $\Delta M = 1.54 \times M - 6.53$,得出震级差 ΔM 为 2.5 级,当主震震级 M 在 5.9~6.1 时,计算出的震级差 ΔM 与真实值接近,没有修正值,因此最大余震估计为 $5.9 - 2.5 = 3.4$ 级。

由最大震级预测的结果,该地震可能为孤立型。

根据上述统计结果,3 天内发生最大余震的约占西北地区东部 5 级以上地震的 60%。根据余震序列比较发育的状况,估计 3 天内就会发生。

再根据上述主震和最大余震时间间隔的经验公式 $\lg T = 1.07 \times M - 4.71$, 当 $M = 5.9$ 级, 可以计算出时间间隔是 $T = 39$ 天, 误差是 ± 10.9 天。该公式计算结果明显与实际误差较大。

2000 年 6 月 6 日 18 时 59 分发生景泰 5.9 级地震, 当日共发生余震 18 次, 震级分布也均匀, 只是没有较大余震发生, 至 6 月 9 日才发生最大余震 2.5 级地震, 后逐渐减弱, 但余震陆续发生, 6 个月后基本结束。实际最大余震和本节的预测的有一定误差, 但是能通过检验。

4 结论和讨论

(1) 西北地区东部 1970 年以来发生的 5 级以上地震(双震型按 1 次地震统计)中走滑型地震占 58.8%, 逆断和逆冲型地震占 19.6%, 正断型地震占 11.8%。

(2) 1970 年以来西北地区东部的 5 级以上地震, 在相同破裂类型和序列类型下, 主震与最大余震的震级关系线性较好, 得到的经验公式可以为西北地区东部同类地震的最大余震震级判定提供参考。

(3) 1970 年以来西北地区东部 5 级以上地震与最大余震发生时间间隔之间的线性关系较差。走滑型和逆断型地震的 60% 以上在主震后的 1 天内发生最大余震; 正断型地震中 16.7% 在主震后 1 天内发生最大余震, 该比例较低, 可能与统计样本量少的有关。

(4) 西北地区东部 5 级以上地震发生后, 应当首先考虑该地震震中附近有记载以来的地震类型, 如果有双震多震型地震发生过, 应根据前震余震序列的发育程度, 分析是否可能为双震多震型, 最大余震震级和时间间隔之间的统计关系不适合双震多震型地震。

(5) 如果西北地区东部 5 级以上地震不是双震多震类型, 分析最大余震时, 可利用经验公式 $\Delta M = 1.54 \times M - 6.53$ 来计算, 其中 ΔM 为最大余震震级差, M 为主震震级。当主震震级 M 在 5~5.8 级时, 计算出的震级差 ΔM 再加一个修正值 1.4 级, 因为这时计算值明显偏小; 当主震震级 M 在 5.9~6.1 时, 计算出的震级差 ΔM 与真实值接近, 没有修

正值; 当主震震级在 6.2 级以上时, 计算出的震级差 ΔM 偏大, 要减去修正值 1.5 级。

参考文献(References)

- [1] 郭增建, 郭安宁, 吴建华, 等. 2015 年 10 月 26 日阿富汗 $M_s 7.8$ 地震发生时间的回顾性预测[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1127-1128.
GUO Zeng-jian, GUO An-ning, WU Jian-hua, et al. Reviewing Prediction for the Occurrence Time of the Afghan $M_s 7.8$ Earthquake on Oct. 26, 2015[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1127-1128. (in Chinese)
- [2] 郭增建, 郭安宁, 由震中迁移交汇预测大震的讨论[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 1-3.
GUO Zeng-jian, GUO An-ning, Discussion on the Prediction of Large Earthquakes Based on the Intersection of Epicenter Migration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 1-3. (in Chinese)
- [3] 郭安宁, 李鑫, 白雪见, 等. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震及相关参数[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 150-158.
GUO An-ning, Li Xin, BAI Xue-jian, et al. The Menyuan, Qinghai $M_s 6.4$ Earthquake on 21 January 2016 and Its Related Parameters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 150-158. (in Chinese)
- [4] 陈棋福. 中国震例(1992—1994)[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
CHEN Qi-fu. Chinese Case(1992—1994)[M]. Beijing: Seismological Press, 2002a. (in Chinese)
- [5] 陈棋福. 中国震例(1995—1996)[M]. 北京: 地震出版社, 2002.
CHEN Qi-fu. Chinese Case(1995—1996)[M]. Beijing: Seismological Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 陈棋福. 中国震例(1997—1999)[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
CHEN Qi-fu. Chinese Case(1997—1999)[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 陈棋福. 中国震例(2000—2002)[M]. 北京: 地震出版社, 2008.
CHEN Qi-fu. Chinese Case(2000—2002)[M]. Beijing: Seismological Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 张肇诚. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
ZHANG Zhao-cheng. Chinese Case(1966—1975)[M]. Beijing: Seismological Press, 1988. (in Chinese)
- [9] 张肇诚. 中国震例(1976—1980)[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
ZHANG Zhao-cheng. Chinese Case(1976—1980)[M]. Beijing: Seismological Press, 1990. (in Chinese)
- [10] 张肇诚. 中国震例(1981—1985)[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
ZHANG Zhao-cheng. Chinese Case(1981—1985)[M]. Beijing: Seismological Press, 1990b. (in Chinese)
- [11] 张肇诚. 中国震例(1986—1988)[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
ZHANG Zhao-cheng. Chinese Case(1986—1988)[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)

Study on Spring Limiting Deformation to Base Isolation Layer under Near-field Ground Motion[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(5): 127-131. (in Chinese)

[49] 耿萍,唐金良,权乾龙,等.穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验[J].中南大学学报:自然科学版, 2013, 44(6):2520-2526.

GENG Ping, TANG Jin-liang, QUAN Qian-long, et al. Shaking Table Test for Tunnel With Shock Absorption Layer Though Fault Zone[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(6): 2520-2526. (in Chinese)

[50] 信春雷,高波,周佳媚,等.跨断层隧道设置常规抗减震措施振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2047-2055.

XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking Table Tests of Conventional Anti-seismic and Damping Measures on Fault-crossing Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2047-2055. (in Chinese)

[51] 易谊.近断层脉冲型地震动下隧道动力响应规律研究[D].重庆:重庆交通大学, 2014.

YI Yi. Study on Dynamic Response Rules of Tunnels under Near-fault Pulse-type Ground Motions[D]. Chongqing: Journal of Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[52] 何川,李林,张景,等.隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J].岩土工程学报, 2014, 36(3): 427-434.

HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic Damage Mechanism of Tunnels Through Fault Zones [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427-434. (in Chinese)

(上接 570 页)

[12] 张肇诚.中国震例(1989—1991)[M].北京:地震出版社, 2000.

ZHANG Zhao-cheng. Chinese Case(1989—1991)[M]. Beijing: Seismological Press, 2000. (in Chinese)

[13] 蒋海昆,代磊,侯海峰,等.余震序列性质判定单参数判据的统计研究[J].地震, 2006, 26(3): 17-25.

JIANG Hai-kun, DAI Lei, HOU Hai-feng, et al. Statistic Study on the Criterion Index for Classification of Aftershock Sequences[J]. Earthquake, 2006, 26(3): 17-25. (in Chinese)

[14] 沈建文,邱瑛,赵志贺.震级—破裂关系与断层破裂模型[J].地球物理学报, 1990, 33(2): 242-248.

SHEN Jian-wen, QIU Ying, ZHAO Zhi-he. Rupture Length Magnitude Relationship and Fault-Rupture Model[J]. Chinese J Geophys, 1990, 33(2): 242-248. (in Chinese)

[15] 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.

WU Kai-tong, JIAO Yuan-bi, LV Pei-ling, et al. Introduction to Earthquake Sequences [M]. Beijing: Beijing University Press, 1990. (in Chinese)

[16] 杨立明,王振亚,程建武,等.祁连—海原地震带中强地震序列类型分布及其应用[J].西北地震学报, 2001, 23(2): 137-141.

YANG Li-ming, WANG Zhen-ya, CHENG Jian-wu, et al. The Distribution of Types of Mid-strong Earthquake Sequences in Qilian—Haiyuan Seismic Zone and Their Application[J]. North-western Seismological Journal, 2001, 23(2): 137-141. (in Chinese)