

中国西北地区东部地震序列参数与 预测余震发生的关系分析^①

许晓庆, 盛菊琴, 马禾青

(宁夏地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要:对1970—2012年西北地区东部的51次5级以上地震序列进行 E_2/E_0 、 $(M_0 - M_3) \lg N_3$ 、 h 值、 K 值和 b 值等参数的计算,结果表明:在震后地震类型初期判别上可优先考虑 E_2/E_0 计算和 K 值计算。 E_2/E_0 对主余型地震和孤立型地震均有较好的预测效果,且不受早期阶段余震数量的限制,当 E_2/E_0 参数判断结果为主余型地震或孤立型地震时,基本上可以确定该结果是准确的; K 值计算对样本量的限制也较为宽松,通过震例计算发现,一般中强震后2~3天内,余震数量基本都可满足 K 值计算,且 K 值具有较高的判别能力,其计算结果也有很好的一致性和稳定性。参数 $(M_0 - M_3) \lg N_3$ 对主余型地震类型判断具有较好的判别能力,但计算条件较为严格,在实际工作中可作为依据参考。 h 值对多震型地震有较高的判断能力,能很好地为震后震情趋势的判断提供参考依据,但该计算参数对样本量要求较高,且其计算结果的稳定性和一致性较弱,因而建议该参数在实际工作中仅可作为参考。

关键词:西北地区东部;地震序列;参数

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)04-0598-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.04.0598

Relation between Earthquake Sequence Parameters and the Prediction of Aftershocks in the Eastern Part of Northwest China

XU Xiao-qing, SHENG Ju-qin, MA He-qing

(Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: In this study, we calculated the parameters E_2/E_0 , $(M_0 - M_3) \lg N_3$, h value, K value, and b value of 51 earthquake sequences of $M \geq 5.0$ in the eastern part of Northwest China from 1970 to 2012. The results show that priority should be given to the E_2/E_0 and K value calculations in making the initial judgment of the earthquake type after the main earthquake. There is a good prediction result regarding the mainshock aftershock earthquake type and isolated earthquake sequence using E_2/E_0 . Moreover, E_2/E_0 is unrestricted with respect to the aftershock number in the early stage. Historically, when the judgment result was based on E_2/E_0 to determine the mainshock-aftershock earthquake type and isolated earthquake sequence, it has generally been correct. The restrictions on the K value calculation are also relatively light. Through earthquake sample calculation, we found that the number of aftershocks within 2~3 days after most moderate-strong earthquakes could satisfy the K value calculation, and the discriminating power of the K value is relatively high. The parameter $(M_0 - M_3) \lg N_3$ has a high discriminatory

^① 收稿日期: 2015-04-13

基金项目: 宁夏回族自治区科技攻关计划项目(102164170); 宁夏自然科学基金资助项目(NZ14228)

作者简介: 许晓庆(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震预测、前兆数据跟踪分析。E-mail: nickfuryvip@163.com。

power when judging the mainshock-aftershock earthquake type, but there are associated strict requirements and could be used as reference in practical work. The h value has a high discriminatory power when judging the multiple mainshock type and can provide a reference for earthquake trend judgment after the mainshock, but calculations by the h value require a sufficient sample number and the consistency and stability of the calculation results are weak. As such, it is suggested for use only as a reference in practical work.

Key words: the eastern part of Northwest China; earthquake sequence; parameter

0 引言

当一次中强地震发生后,人们最关心的是这次地震的性质:是后续更大地震的前震,还是一次主震。如果是一次前震,那么后续将要发生的主震会有多大,在什么时候发生;如果是一次主震,其后续的最大余震震级是多大,会在什么时段内发生。对地震序列的地震学参数进行研究有助于判定地震序列的类型,因此地震序列类型判定的地震学参数方法也是地震工作者研究的重要方向之一。

早在 1971 年吴开统等^[1]就研究了地震序列的基本类型及其在地震预报中的应用;之后周翠英^[2]针对地震类型判断方法进行了探讨;刘正荣等^[3-7]探索了地震的频度衰减与地震预报问题;朱传镇等^[8]从地震信息熵异常出发,探索地震预报的途径;陈立德等^[9]、韩渭滨等^[10]提出了地震序列类型的早期判定方法;习守中等^[11]研究了中国大陆地震序列的时间分布特征;周翠英等^[12]利用模式识别的方法提取地震序列早期判断的综合指标;蒋海昆等^[13-16]通过对中国大陆中强地震的序列研究,从历史活动地震背景、区域地震活动背景、余震空间分布的特征、事件序列的演化、主震与余震震级能量的差异及数理统计等方面做了较为深入的研究分析,提出了余震序列类型判定的单参数判据的统计评价;杨立明等^[17]对祁连—海原地震带中强地震序列类型分布及其应用进行了研究;冯洪武等^[18]针对 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震及其余震序列进行了重定位;裴慧娟等^[19]对 2013 年 4 月 22 日内蒙古通辽 5.3 级地震的序列特征及发震背景进行了分析。以上学者的研究对本工作的开展都有重要的指导意义和参考价值。

本文依据蒋海昆^[13]提出的单参数判据结论,结合实际情况,对西北地区东部 1970 年以来的 5 级以上地震序列选择分辨能力较好的地震序列参数进行计算分析,进一步探讨这些参数在震后地震趋势判断中的应用。

1 资料选取及参数选择

1970 年 1 月至 2012 年 12 月西北地区东部 ($33.0^{\circ}\sim 43.0^{\circ}\text{N}$, $97.0^{\circ}\sim 110.0^{\circ}\text{E}$) 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。因此本文统计了西北地区东部 5 级以上地震事件共 51 次(组),其中 5.0~5.9 级地震 39 次,6.0~6.9 级地震 11 次,7.0 级地震 1 次(表 1)。

韩渭滨等^[10]在研究了四川省的地震序列特征后,认为统一按照 K - K 法^[20]统计余震是不合适的;还指出对于多震区来说,选取余震最好逐个强震具体研究,若要找统计关系,也一定要用本地区资料。在多年的地震预测研究中也发现, K - K 法^[20]给出的余震序列时空范围总体偏大。为进一步开展余震序列的精细研究,本文在余震目录的选取中,宏观上以 K - K 法^[20]给出的时、空范围为基础进行把握,具体以实际地震活动的时间和空间分布特征进行手动挑选:时间上以主震震中附近弱震活动增强为序列的起始时间,震后以弱震活动恢复至震前该区域正常活动水平为结束时间;空间上以震中附近地震活动增强区域为主,不大于 K - K 法^[20]给出的空间范围,晚期强余震未统计在内,如 1990 年青海共和 7.0 级地震的晚期强余震。

判定序列类型的参数较多^[16],本文选取 E_2/E_0 、 $(M_0-M_3)\lg N_3$ 、 h 值、 K 值和 b 值进行计算。计算参数时把握中强地震类型的初期判定和震后地震序列随时间进程的发展两个方面,结合序列类型的划分标准(震后 3 个月内的余震统计),选取震后 3 天、10 天、30 天及 60 天内的余震序列参与计算,每种序列参数的计算以样本量满足其计算要求为前提。在计算时通过震后不同时段序列参数的计算结果与震例类型的对比、统计,最终给出该序列参数的预测效果。西北地区东部 5 级以上地震序列参数计算结果见表 1。

Table 1 The sequence parameters of $M_s\geqslant 5.0$ earthquakes occurred in the eastern part of Northwest China																
序号	事件	震级 / M_s	最大余震/ M_s 发震时间	序列 震级 类型	震后 /天	h	b	类型 判定	K	类型 判定	E_2/E_0	类型 判定	$(M_0-M_3)\lg N_3$	类型 判定		
1	1970-12-03 宁夏西吉	5.1	-	-	孤立	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	1971-03-24 青海玛多北	6.3	1971-03-24	3.2	孤立	3	-	-	$K=0.000\ 7\leqslant 0.001\ 5$	孤立	$0<0.01$	主余或 孤立型	-	-		
3	1971-06-28 宁夏吴忠	5.1	1971-06-28	3.9	主余	3 10 30 60	0.98 1.40 1.3 1.2	0.55 0.54 0.54 0.54	前震 双震 双震 双震	$K=0.087\ 8\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.086\ 4\geqslant 0.05$ $K=0.086\ 4\geqslant 0.05$ $K=0.086\ 2\geqslant 0.05$	震群 震群 震群 震群	$0.067\geqslant 0.01$	震群或 双震型	$0.481\ 65\leqslant 0.6$	主余	
4	1974-09-23 四川若尔盖	5.6	1974-09-23	2.3	孤立	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
5	1975-01-04 青海哈拉海	5.3	1975-01-05	3.7	主余	10 30 3	1.3 1.3 0.83	0.43 0.41 0.48	主余 主余 前震	$0.001\ 5\leqslant K=0.034\ 5\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.031\ 5\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.009\ 3\leqslant 0.050\ 0$	主余 主余 主余	$0.014\geqslant 0.01$	震群或 双震型	$0\leqslant 0.6$	主余	
6	1976-09-23 内蒙古巴音 木仁	6.2	1976-09-23	4.5	主余	10 30 60	1.0 1.0 0.9	0.52 0.53 0.38	前震 前震 前震	$0.001\ 5\leqslant K=0.008\ 8\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.008\ 6\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.008\ 2\leqslant 0.050\ 0$	主余 主余 主余	$0.004\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	$0.451\ 54\leqslant 0.6$	主余	
7	1977-12-16 青海玉树东北	5.3	1977-12-16	3.4	主余	-	-	-	-	-	$0.002\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	$0\leqslant 0.6$	主余		
8	1978-02-21 青海久治北	5.1	1978-02-22	2.4	孤立	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
9	1979-08-25 内蒙古五原	6.0	1979-08-25	5.1	震群	3 10 30 60 3	1.32 2.0 1.4 0.8 0.53	0.33 0.39 0.5 0.5 0.5	主余 主余 主余 前震 前震	$K=0.093\ 2\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.082\ 7\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.073\ 2\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.067\ 5\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.001\ 2\leqslant 0.050\ 0$	震群 震群 震群 震群 孤立	$0.045\geqslant 0.01$	震群或 双震型	$0\leqslant 0.6$	主余	
10	1980-04-18 青海天俊	5.2	1980-04-24	5.0	震群	10 30 60 3	0.5 0.4 0.5 1.32	0.48 0.49 0.47 0.53	前震 前震 前震 主余	$K=0.129\ 9\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.122\ 9\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.122\ 5\geqslant 0.050\ 0$ $K=0.000\ 6\leqslant 0.001\ 5$	震群 震群 震群 孤立	$0.002\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
11	1982-04-14 宁夏海原	5.5	1982-04-14	2.6	孤立	10 30 60	1.08 2.1 2.1	0.36 0.38 0.40	双震 主余 主余	$K=0.000\ 5\leqslant 0.001\ 5$ $K=0.000\ 5\leqslant 0.001\ 5$ $K=0.000\ 5\leqslant 0.001\ 5$	孤立 孤立 孤立	$0.000\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
12	1983-01-17 内蒙古磴口	5.1	1983-01-18	1.7	孤立	30 60 3	- 0.6 0.56	- 0.59 0.53	- 前震 前震	$K=0.000\ 2\leqslant 0.001\ 5$ $K=0.000\ 2\leqslant 0.001\ 5$ $0.001\ 5\leqslant K=0.010\ 2\leqslant 0.050\ 0$	孤立 孤立 主余	$0.000\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
13	1984-01-06 甘肃天祝	5.2	1984-04-06	3.9	主余	10 30 60 3	2.0 1.5 1.4 3.5	0.58 0.6 0.61 0.41	主余 主余 主余 主余	$0.001\ 5\leqslant K=0.014\ 0\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.013\ 5\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.013\ 3\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.006\ 8\leqslant 0.050\ 0$	主余 主余 主余 主余	$0.005\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	$0\leqslant 0.6$	主余	
14	1984-02-17 青海祁连西南	5.2	1984-02-17	3.1	主余	10 30 60 3	2.7 1.9 1.8 3.49	0.44 0.47 0.46 0.64	主余 主余 主余 主余	$0.001\ 5\leqslant K=0.013\ 5\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.006\ 4\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.007\ 1\leqslant 0.050\ 0$ $K=0.000\ 7\leqslant 0.001\ 5$	主余 主余 主余 孤立	$0.002\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	$0.906\ 53\geqslant 0.6$	震群或 双震型	
15	1984-11-23 宁夏灵武	5.2	1985-02-18	3.9	主余	10 30 60 3	1.8 1.4 1.3 1.72	0.7 0.77 0.7 0.64	主余 主余 主余 主余	$K=0.001\ 4\leqslant 0.001\ 5$ $K=0.001\ 4\leqslant 0.001\ 5$ $0.001\ 5\leqslant K=0.009\ 2\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.024\ 3\leqslant 0.050\ 0$	孤立 孤立 主余 主余	$0.000\leqslant 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
16	1986-08-26 青海门源	6.2	1986-09-17	5.4	震群	10 30 60	1.90 1.70 1.6	0.67 0.70 0.70	主余 主余 主余	$0.001\ 5\leqslant K=0.023\ 7\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.034\ 5\leqslant 0.050\ 0$ $0.001\ 5\leqslant K=0.034\ 2\leqslant 0.050\ 0$	主余 主余 主余	$0.025\geqslant 0.01$	震群或 双震型	$0.477\ 12\leqslant 0.6$	主余	

续表 1																
序号	事件	震级 / M_s	最大余震/ M_s 发震时间	震级	序列 类型	震后 /天	h	b	类型 判定	K	类型 判定	E_2/E_0	类型 判定	$(M_0-M_3)\lg N_3$	类型 判定	
17	1987-01-08 甘肃迭部	5.8	1987-03-03	4.1	主余	3	0.73	0.61	前震	$K=0.000\ 4\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						10	1.6	0.58	主余	$K=0.000\ 7\leq 0.001\ 5$	孤立					
						30	1.2	0.63	主余	$K=0.000\ 9\leq 0.001\ 5$	孤立					
						60	1.1	0.58	双震	$0.001\ 5\leq K=0.004\ 3\leq 0.050\ 0$	主余					
18	1987-08-10 宁夏灵武	5.5	1987-08-10	4.4	主余	3	2.91	0.59	主余	$K=0.092\ 6\geq 0.050\ 0$	震群	$0.080\geq 0.01$	震群或 双震型	$0.429\ 41\leq 0.6$	主余	
						10	2.3	0.63	主余	$K=0.088\ 3\geq 0.050\ 0$	震群					
						30	2.1	0.62	主余	$K=0.087\ 1\geq 0.050\ 0$	震群					
						60	1.7	0.66	主余	$K=0.083\ 2\geq 0.050\ 0$	震群					
19	1988-01-04 宁夏灵武	5.5	1988-01-10	5.0	震群	3	0.39	0.64	前震	$0.001\ 5\leq K=0.006\ 2\leq 0.050\ 0$	主余	$0.001\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						10	0.90	0.60	前震	$K=0.166\ 1\geq 0.050\ 0$	震群					
						30	0.80	0.38	前震	$K=0.152\ 0\geq 0.050\ 0$	震群					
						60	0.70	0.41	前震	$K=0.140\ 3\geq 0.050\ 0$	震群					
20	1988-11-22 甘肃肃南	5.7	1988-12-04	5.1	震群	3	0.36	0.54	前震	$K=0.001\ 3\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						10	0.32	0.48	前震	$K=0.001\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立					
						30	0.9	0.44	前震	$K=0.117\ 9\geq 0.050\ 0$	震群					
						60	0.9	0.47	前震	$K=0.112\ 7\geq 0.050\ 0$	震群					
21	1989-11-02 宁夏固原	5.0	1989-11-02	2.4	孤立	30	3.5	0.46	主余	$K=0.001\ 3\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						60	0.8	0.67	前震	$K=0.001\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立					
22	1990-4-26 青海共和	7.0	1990-5-16	5.4	主余	-	-	-	-	$0.001\ 5\leq K=0.024\ 6\leq 0.050\ 0$	主余	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						-	-	-	-	$0.0015\leq K=0.023\ 3\leq 0.050\ 0$	主余					
23	1990-10-20 甘肃景泰	6.2	1990-10-20	4.2	主余	3	0.77	0.53	前震	$0.001\ 5\leq K=0.004\ 1\leq 0.050\ 0$	主余	$0.002\leq 0.01$	主余或 孤立型	$0.511\ 75\leq 0.6$	主余	
						10	2.3	0.56	主余	$0.001\ 5\leq K=0.004\ 0\leq 0.050\ 0$	主余					
						30	2.1	0.58	主余	$0.001\ 5\leq K=0.003\ 9\leq 0.050\ 0$	主余					
						60	2.0	0.57	主余	$0.001\ 5\leq K=0.004\ 1\leq 0.050\ 0$	主余					
24	1991-01-02 青海祁连	5.1	1991-01-09	2.8	主余	3	3.5	0.71	主余	$0.001\ 5\leq K=0.006\ 9\leq 0.050\ 0$	主余	$0.002\leq 0.01$	主余或 孤立型	$0.541\ 85\leq 0.6$	主余	
						10	1.9	0.56	主余	$0.001\ 5\leq K=0.011\ 8\leq 0.050\ 0$	主余					
						30	1.9	0.56	主余	$0.001\ 5\leq K=0.011\ 8\leq 0.050\ 0$	主余					
						60	1.7	0.59	主余	$0.001\ 5\leq K=0.011\ 3\leq 0.050\ 0$	主余					
25	1991-01-13 内蒙古阿左旗	5.3	1991-02-07	3.6	主余	30	-	-	-	$0.001\ 5\leq K=0.008\ 0\leq 0.050\ 0$	主余	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						60	-	-	-	$0.001\ 5\leq K=0.007\ 7\leq 0.050\ 0$	主余					
26	1991-06-16 内蒙古阿左旗	5.3	1991-06-16	2.1	孤立	60	3.5	0.42	主余	$K=0.000\ 0\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
27	1991-09-14 内蒙古阿左旗	5.0	1991-09-15	3.1	主余	10	-	-	-	$0.001\ 5\leq K=0.007\ 1\leq 0.050\ 0$	主余	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	$0\leq 0.6$	主余	
						30	-	-	-	$0.001\ 5\leq K=0.006\ 5\leq 0.050\ 0$	主余					
						60	-	-	-	$0.001\ 5\leq K=0.011\ 1\leq 0.050\ 0$	主余					
28	1991-10-01 青海门源	5.2	1991-10-06	3.5	主余	3	1.21	0.95	主余	$K=0.000\ 4\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						10	0.88	0.75	前震	$0.001\ 5\leq K=0.009\ 1\leq 0.050\ 0$	主余					
						30	1.3	0.71	主余	$0.001\ 5\leq K=0.010\ 5\leq 0.050\ 0$	主余					
						60	1.2	0.69	主余	$0.001\ 5\leq K=0.010\ 4\leq 0.050\ 0$	主余					
29	1992-01-12 甘肃嘉峪关	5.4	1992-01-12	2.2	孤立	60	3.5	0.38	主余	$K=0.000\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
30	1992-06-21 青海祁连西北	5.0	1992-07-26	2.1	孤立	-	-	-	-	-	-	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
31	1992-11-30 四川石渠	5.1	-	-	孤立	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	1993-10-26 青海祁连	6.0	1993-10-26	3.1	孤立	3	0.83	0.72	前震	$K=0.000\ 0\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						10	1.7	0.81	主余	$K=0.000\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立					
						30	1.6	0.83	主余	$K=0.000\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立					
						60	1.2	0.71	主余	$K=0.000\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立					
33	1994-01-03 青海共和	6.0	1994-02-16	5.8	震群	10	1.0	0.42	前震	$K=0.000\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立	$0.000\leq 0.01$	主余或 孤立型	-	-	
						30	0.8	0.41	前震	$K=0.000\ 1\leq 0.001\ 5$	孤立					
						60	0.3	0.5	前震	$K=0.196\ 0\geq 0.001\ 5$	震群					

续表 1

序号	事件	震级 /M _s	最大余震/M _s 发震时间	序列 震级	震后 类型	震后 /天	<i>h</i>	<i>b</i>	类型 判定	<i>K</i>	类型 判定	<i>E</i> ₂ / <i>E</i> ₀	类型 判定	(<i>M</i> ₀ − <i>M</i> ₃)lg <i>N</i> ₃	类型 判定
34	1995-07-22 甘肃永登	5.8	1995-07-22	3.2	主余	3	1.46	0.79	主余	<i>K</i> = 0.000 6 ≤ 0.001 5	孤立	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
						10	1.27	0.81	主余	<i>K</i> = 0.000 6 ≤ 0.001 5	孤立				
						30	2.2	0.78	主余	<i>K</i> = 0.000 7 ≤ 0.001 5	孤立				
						60	2.1	0.77	主余	<i>K</i> = 0.000 7 ≤ 0.001 5	孤立				
35	1995-12-18 青海果洛	6.2	1995-12-20	5.5	主余	-	-	-	-	<i>K</i> = 0.152 9 ≥ 0.050 0	震群	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0 ≤ 0.6	主余
						60	1.3	0.28	主余	<i>K</i> = 0.143 1 ≥ 0.050 0	震群				
						3	1.39	0.58	主余	<i>K</i> = 0.001 1 ≤ 0.001 5	孤立				
36	1996-05-03 内蒙古包头	6.4	1996-05-10	4.0	主余	10	1.6	0.61	双震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.001 8 ≤ 0.050 0	主余	0.001 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
						30	1.5	0.57	双震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.001 9 ≤ 0.050 0	主余				
						60	1.5	0.57	双震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.001 9 ≤ 0.050 0	主余				
37	1996-06-01 甘肃天祝	5.4	1996-06-08	2.7	孤立	3	0.98	0.38	前震	<i>K</i> = 0.001 1 ≤ 0.001 5	孤立	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
						10	0.86	0.36	前震	<i>K</i> = 0.000 5 ≤ 0.001 5	孤立				
38	1996-10-09 青海玛多	5.0	1996-10-11	2.9	孤立	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	1997-10-21 内蒙古乌拉特后旗	5.0	1997-10-26	4.2	主余	30	0.3	0.3	前震	<i>K</i> = 0.118 5 ≥ 0.050 0	震群	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
						60	0.3	0.33	前震	<i>K</i> = 0.110 9 ≥ 0.050 0	震群				
40	1999-09-27 青海河南	5.1	1999-09-27	3.2	主余	60	0.4	0.42	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.004 5 ≤ 0.050 0	主余	0.001 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0 ≤ 0.6	主余
41	1999-11-26 青海玛沁	5.0	1999-12-8	4.3	主余	60	0.3	0.25	前震	<i>K</i> = 0.104 8 ≥ 0.050 0	震群	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
42	2000-06-06 甘肃景泰	5.9	2000-06-09	2.5	主余	3	0.36	0.32	前震	<i>K</i> = 0.000 2 ≤ 0.001 5	孤立	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
						10	1.2	0.32	双震	<i>K</i> = 0.000 3 ≤ 0.001 5	孤立				
						30	1.2	0.32	双震	<i>K</i> = 0.000 3 ≤ 0.001 5	孤立				
						60	1.1	0.32	双震	<i>K</i> = 0.000 3 ≤ 0.001 5	孤立				
43	2000-09-12 青海兴海	6.6	2000-10-20 (3 次)	5.0 (3 次)	主余	3	0.39	0.22	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.044 0 ≤ 0.050 0	主余	0.019 ≥ 0.01	震群或 双震型	1.011 6 ≤ 0.6	震群或 双震型
						10	1.3	0.27	双震	<i>K</i> = 0.052 2 ≥ 0.050 0	震群				
						30	1.0	0.29	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.050 0 ≤ 0.050 0	主余				
						60	1.0	0.3	前震	<i>K</i> = 0.059 9 ≥ 0.050 0	震群				
44	2001-07-11 甘肃肃南	5.3	2001-07-18	3.2	主余	3	1.58	0.28	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.006 7 ≤ 0.050 0	主余	0.002 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0.541 85 ≤ 0.6	震群或 双震型
						10	2.1	0.28	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.009 7 ≤ 0.050 0	主余				
						30	1.6	0.3	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.009 0 ≤ 0.050 0	主余				
45	2002-12-14 甘肃玉门	5.9	2002-12-14	4.3	主余	3	2.16	0.56	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.034 0 ≤ 0.050 0	主余	0.021 ≥ 0.01	震群或 双震型	0.301 03 ≤ 0.6	主余
						10	1.9	0.42	双震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.033 4 ≤ 0.050 0	主余				
						30	1.8	0.44	双震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.032 7 ≤ 0.050 0	主余				
						60	1.7	0.42	双震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.033 0 ≤ 0.050 0	主余				
46	2003-10-25 甘肃民乐	6.1	2003-10-25	5.8	震群	3	1.72	0.42	主余	<i>K</i> = 0.132 1 ≥ 0.050 0	震群	0.704 ≥ 0.01	震群或 双震型	0.100 ≤ 0.6	主余
						10	1.8	0.43	双震	<i>K</i> = 0.127 9 ≥ 0.050 0	震群				
						30	1.7	0.44	双震	<i>K</i> = 0.125 1 ≥ 0.050 0	震群				
47	2003-11-13 甘肃岷县	5.2	2003-11-13	3.2	主余	60	1.6	0.44	双震	<i>K</i> = 0.123 2 ≥ 0.050 0	震群	0.003 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0.511 75 ≤ 0.6	主余
						10	-	-	-	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.012 5 ≤ 0.050 0	主余				
						30	-	-	-	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.010 4 ≤ 0.050 0	主余				
48	2004-09-07 甘肃岷县	5.0	2004-09-10	2.0	主余	60	0.4	0.26	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.009 9 ≤ 0.050 0	主余	0.000 ≤ 0.01	主余或 孤立型	-	-
						3	-	-	-	<i>K</i> = 0.000 8 ≤ 0.001 5	孤立				
						3	0.98	0.48	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.010 2 ≤ 0.050 0	主余				
49	2006-06-21 甘肃文县	5.0	2006-06-21	3.4	主余	3	0.98	0.48	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.010 2 ≤ 0.050 0	主余	0.005 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0.421 44 ≤ 0.6	主余
						10	2.2	0.52	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.009 2 ≤ 0.050 0	主余				
						30	1.6	0.58	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.008 6 ≤ 0.050 0	主余				
						60	1.3	0.58	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.009 4 ≤ 0.050 0	主余				
50	2008-03-30 甘肃肃南	5.0	2008-04-21	4.0	主余	3	0.77	0.65	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.018 3 ≤ 0.050 0	主余	0.010 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0.000 ≤ 0.6	主余
						10	1.2	0.76	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.016 8 ≤ 0.050 0	主余				
						30	1.1	0.77	主余	<i>K</i> = 0.050 2 ≥ 0.050 0	震群				
						60	1.0	0.73	前震	<i>K</i> = 0.054 8 ≥ 0.050 0	震群				
51	2012-05-3 甘肃金塔	5.4	2012-05-03	3.8	主余	3	0.98	0.9	前震	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.0051 ≤ 0.050 0	主余	0.005 ≤ 0.01	主余或 孤立型	0 ≤ 0.6	主余型
						10	1.5	0.95	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.005 1 ≤ 0.050 0	主余				
						30	1.5	0.94	主余	0.001 5 ≤ <i>K</i> = 0.005 1 ≤ 0.050 0	主余				

2 序列参数预测结果分析

2.1 E_2/E_0 计算(主震后 2 天余震活动)

通常地震发生后几小时乃至几天内余震样本数量较少,不足以满足大多数地震学序列参数的计算条件,但是快速、准确地作出对震后地震趋势的判断是实际工作中所必需的。而 E_2/E_0 对余震样本数量要求不高,较适合序列类型早期判定。设序列中当前的最大地震 M_0 的能量为 E_0 ,在这一最大地震发生后的 2 天内与 M_0 的震级差小于等于 3.5 级的所有地震的能量之和为 E_2 ,则若 $E_2/E_0 < 0.01$,则该序列可能为主余或孤立型,若 $E_2/E_0 > 0.01$,则该序列可能为震群型或多震型。表 1 中的计算结果显示,51 次震例中,除 1970 年 12 月宁夏西吉 5.1 级、1974 年 9 月四川若尔盖 5.6 级、1978 年 2 月青海久治 5.1 级、1992 年 6 月青海祁连 5.0 级、1992 年 11 月四川石渠及 1996 年 10 月青海玛多 5.0 级地震由于本身可能是孤立型地震,余震发生较少,或者因为当时监测能力的制约,无法记录到小地震,而没有足够的余震样本外,其他 45 次震例均可以计算。45 次震例中孤立型地震为 8 次,判断正确 8 次,准确率 100%;主余型地震 30 次,判断正确 25 次,准确率为 83.3%;多震型地震为 7 次,判断正确 3 次,准确率为 42.8%。可以看出 E_2/E_0 对主余型地震和孤立型地震均有很好的预测效果,但对多震型地震的预测效果较差,因此,当 E_2/E_0 参数判断结果为主余型地震或孤立型地震时,基本上可以认为该判定结果是比较准确的,但如果判断为多震型,则该结论还需要进一步分析判断。当然实际上由于多震型地震本身就是较少发生的地震类型,本计算中多震型总样本量也只有 7 次,样本量太少,42.8%的准确率也仅仅是个计算结果。

2.2 $(M_0 - M_3) \lg N_3$ 计算(主震后 3 天余震活动)

地震序列早期类型快速判定的另一个常用参数是 $(M_0 - M_3) \lg N_3$,即以主震后 3 天之内的序列去判断地震类型。设序列在主震发生后 3 天内最大余震的震级为 M_3 ,与主震震级之差小于 2 级的地震次数为 N ,若 $(M_0 - M_3) \lg N_3 \leq 0.6$,则该序列可能为主余型,若 $(M_0 - M_3) \lg N_3 > 0.6$,则该序列可能为双震或多震型。从表 1 中可以看出,51 次震例由于样本量不足或无震级差小于 2 级的余震的情况外,能参与判断的震例只有 22 次,因此该参数对余震序列的个数和震级分布等均有较高要求。对于孤立型地震,因为余震本身就少,能满足计算判断条件的震例更少,因此 $(M_0 - M_3) \lg N_3$ 不适用。在 19 次主余型震例中,有 3

次判断错误,准确率为 84.2%,而针对 3 次震群事件全部判断错误。由于震群样本只有 3 次,所以在今后工作中对该参数的计算还需要更多震例资料的积累。

2.3 h 值判定

h 值表征地震频度的衰减特征,在日常工作中常用于地震序列类型的判定。而对于 b 值,尽管很多文献指出前震 b 值高于余震 b 值,并且 b 值在强余震之前有降低的趋势,即同一序列中 b 值的时间变化对强余震具有一定的时间预测能力。但蒋海昆^[15-16]在分析了中国大陆中强震余震序列后,认为在 95% 的置信度概率下,震后不同时段孤立型、主余型、多震型 3 种类型序列 b 值的置信区间相互重叠,即 b 值对序列类型无分辨能力,因此本工作中 b 值计算仅作为参考。统计中约定:如果震例为孤立型或主余型地震,而 h 值判定结果为主余或孤立型地震,均认为该判断正确,若判断为前兆型或多震型序列,则认为该判断错误;同理,若震例为多震型地震,而 h 值判断为前兆或多震型,则认为该判断正确,否则认为该判断错误。计算中按照震后 3、10、30、60 天分别计算各参数的预测结果, h 值整体准确率为 60% 左右,其中针对主余或孤立型地震的准确率为 56.8%,针对多震型地震的准确率为 70.4%,因此 h 值对多震型的地震具有更好的预测效能。进一步分析发现,不同时段内余震对 h 值的影响很大,同一次地震不同时段内的 h 值计算常会出现截然相反的判断结果,即 h 值结果不稳定,一致性较差。

2.4 K 值

K 值描述的是地震序列能量分配均匀程度的一个统计量, $K-t$ 反映了序列地震能量的分配均匀程度随时间的变化。对于 6 级左右地震,在序列发生的早期,序列主要事件的信息还不完整,当 $K \geq 0.05$ 时可认为该地震序列是震群型地震;当 $0.0015 \leq K \leq 0.05$ 时可认为是主余型地震;当 $K \leq 0.0015$ 时可认为是孤立型地震。通过对震例计算发现 K 值的准确率为 80.7%,其中主余型地震的判断准确率为 82.4%,孤立型地震全部判断正确,而多震型地震判断准确率为 62.9%。从整个计算结果来看, K 值具有良好的一致性,针对同一地震,多数情况下 K 值的判断结果基本是一致的,而且随着余震数目的不断增多, K 的计算数值变化非常微小,结果也更加符合实际情况,其准确性和稳定性都相对较高。

3 结论和讨论

根据上述序列参数计算结果,分析认为在震后地

震类型初期判别上可优先考虑 E_2/E_0 计算和 K 值计算。 E_2/E_0 对主余型地震和孤立型地震均有较好的预测效果,且不受早期阶段余震数量限制,当 E_2/E_0 参数判断结果为主余型或孤立型地震时,基本上可以确定该结果是准确的,但若判断为多震型,则该结论还有待于进一步判定; K 值计算对样本量的限制也较为宽松,通过震例计算发现,一般中强震后 2~3 天内,余震数量基本可满足 K 值计算,且 K 值具有较高的判别能力,其计算结果也有很好的一致性和稳定性。参数 $(M_0 - M_3) \lg N_3$ 对主余型地震类型判断具有较好的判别能力,但计算条件较为严格,在实际工作中可作为依据参考。 h 值对多震型地震有较高的判断能力,能很好地为震后震情趋势的判断提供参考依据,但该计算参数对样本量要求较高,且其计算结果的稳定性和一致性较弱,因而建议该参数在实际工作中仅作为参考。

1987 年 8 月 10 日、1988 年 1 月 4 日和 1 月 10 日在宁夏灵武分别发生了 5.5、5.5 和 5.0 级地震,若按本章对地震类型的划分,则 1987 年 8 月 10 日宁夏灵武 5.5 级地震为主余型地震,1988 年 1 月 4 日和 1 月 10 日 5.5 级和 5.0 级为震群型地震。 K 值计算结果判断这 3 次地震均属于多震型地震事件, E_2/E_0 也得到相同的结论。而 2000 年 9 月 12 日青海海海 6.6 级地震后连续发生 3 次 5 级左右余震,从地震类型的定义上来看该次事件划分为主余型地震是合理的,但前 3 天 K 值的计算结果判断为主余型地震,前 10 天 K 值判断结果为震群型,前 30 天判断结果又为主余型,前 60 天判断结果又变为震群型。可以看出 K 值计算结果在主余型和震群型之间来回波动,同样 E_2/E_0 也得到相同的结论。这也说明了 K 值和 E_2/E_0 对多震型的地震具有较强的敏感性。

参考文献(References)

- [1] 吴开统.地震序列的基本类型及其在地震预报中的应用[J].地震战线,1971,7(11):45-51.
WU Kai-tong. The Basic Types of Earthquake Sequences and the Applications in Earthquake Prediction[J]. Earthquake Front, 1971, 7(11): 45-51. (in Chinese)
- [2] 周翠英,房桂荣,章爱娣,等.地震类型判断方法探讨[J].西北地震学报,1980,2(2):45-49.
ZHOU Cui-ying, FANG Gui-rong, ZHANG Ai-di, et al. Investigation on Judging Method about Earthquake Types[J]. Northwestern Seismological Journal, 1980, 2(2): 45-49. (in Chinese)
- [3] 刘正荣,钱兆霞,王维清,等.前震的一个标志——地震频度的衰减[J].地震研究,1979,2(4):1-9.
LIU Zheng-rong, QIAN Zhao-xia, WANG Wei-qing, et al. One of the

- Signs of Foreshocks——Frequency Attenuation of Earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 1979, 2(4): 1-9. (in Chinese)
- [4] 刘正荣.根据地震频度衰减预报地震的工作细则[J].地震,1984(1):35-38.
LIU Zheng-rong. A Code of Practice for Earthquake Prediction Using Frequency Attenuation of Earthquakes[J]. Earthquake, 1984(1): 35-38. (in Chinese)
- [5] 刘正荣,孔昭麟.地震频度衰减与地震预报[J].地震研究,1986,9(1):1-12.
LIU Zheng-rong, KONG Zhao-lin. Earthquake Frequency Attenuation and Earthquake Prediction[J]. Journal of Seismological Research, 1986, 9(1): 1-12. (in Chinese)
- [6] 刘正荣.地震发生的极限时间[C]//刘正荣地震预报研究文集,地震通讯,2002:60-64.
LIU Zheng-rong. The Limit Time of Earthquake Occurrence[C]//LIU Zheng-rong Collected Works of Earthquake Prediction Research, Earthquake Communication, 2002: 60-64. (in Chinese)
- [7] 刘正荣.用极限事件法分析四川吉易地震[C]//刘正荣地震预报研究文集,地震通讯,2002:65-66.
LIU Zheng-rong. Analysing Sichuan Ji-yi Earthquake by Using the Limit Incident Method[C]//LIU Zheng-rong Collected Works of Earthquake Prediction Research, Earthquake Communication, 2002: 65-66. (in Chinese)
- [8] 朱传镇,王林瑛.震群信息熵异常与地震预报[C]//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,1989:229-242.
ZHU Chuan-zhen, WANG Lin-ying. Information Entropy Anomaly of Earthquake Swarm with Earthquake Prediction[C]//The Practical Collected Research Works of Earthquake Prediction Methods. Seismology Album. Beijing: Academic Press, 1989: 229-242. (in Chinese)
- [9] 陈立德,蔡静观,孙志民,等.震后趋势早期判定的初步研究[J].地震研究,1992,15(4):355-365.
CHEN Li-de, CAI Jing-guan, SUN Zhi-ming, et al. A Preliminary Study on the Early-stage Judgement of Post Event Tendency[J]. Journal of Seismological Research, 1992, 15(4): 355-365. (in Chinese)
- [10] 韩渭滨,王虹,曾健,等.中强以上地震的震后趋势早期综合判定方法研究[J].地震学报,1993,15(1):15-21.
HAN Wei-bin, WANG Hong, ZENG Jian, et al. Study on the Comprehensive Judgment Method of Early Earthquake Trend of Moderate Strong Earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 1993, 15(1): 15-21. (in Chinese)
- [11] 习守中,王红卫,华爱军.中国大陆地区地震序列显著地震的时间分布特征[J].中国地震,1995,11(4):315-326.
DIAO Shou-zhong, WANG Hong-wei, HUA Ai-jun. Characteristics of Time Distribution of Remarkable Earthquakes in Earthquake Sequences in China Mainland[J]. Earthquake Research in China, 1995, 11(4): 315-326. (in Chinese)
- [12] 周翠英,张宇霞,王红卫,等.以模式识别方法提取地震序列早期判断综合指标[J].地震学报,1996,18(1):118-124.
ZHOU Cui-ying, ZHANG Yu-xia, WANG Hong-wei, et al.

The Aggregative Indicator of Early Diagnosis of Earthquake Sequences Drew from the Pattern Identification Method[J]. Acta Seismologica Sinica,1996,18(1):118-124.(in Chinese)

[13] 蒋海昆,聂晓红.后续地震发生时间估计及序列性质判定——以海城 7.4 级地震及巴楚—伽师 6.8 级震序列为例[J].内陆地震,2003,17(3):193-201.

JIANG Hai-kun, NIE Xiao-hong. Follow Earthquakes Occurring Time Estimation and Sequence Character Judgment——Exemplified by Haicheng $M_S7.4$ and Jiashi—Bachu $M_S6.8$ Earthquakes[J]. Inland Earthquake, 2003, 17(3): 193-201. (in Chinese)

[14] 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,2006,28(4):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, 28(4): 17-25. (in Chinese)

[15] 蒋海昆,郑建常,代磊,等.中国大陆余震序列类型的综合判定[J].地震,2007,27(1):17-25.

JIANG Hai-kun, ZHENG Jian-chang, DAI Lei, et al. Synthetic Judgment of Types of Aftershock Sequences in Chinese Mainland[J]. Earthquake, 2007, 27(1): 17-25. (in Chinese)

[16] 蒋海昆,傅征祥,刘杰,等.中国大陆地震序列研究[M].北京:地震出版社,2007.

JIANG Hai-kun, FU Zheng-xiang, LIU Jie, et al. Study on Earthquake Sequences in Chinese Mainland[M]. Beijing: Seismological Press, 2007. (in Chinese)

[17] 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]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(2): 137-141. (in Chinese)

[18] 冯红武,张元生,刘旭宙,等.2013 年甘肃岷县漳县 $M_S6.6$ 地震及其余震序列重定位[J].地震工程学报,2013,35(3):443-447.

FENG Hong-wu, ZHANG Yuan-sheng, LIU Xu-zhou, et al. Relocation of Mainshock and Aftershocks of the 2013 Minxian—Zhangxian $M_S6.6$ Earthquake in Gansu[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 443-447. (in Chinese)

[19] 裴惠娟,韩晓明,张帆,等.内蒙古通辽 5.3 级地震序列特征及发震背景分析[J].地震工程学报,2015,37(1):242-247.

PEI Hui-juan, HAN Xiao-ming, ZHANG Fan, et al. Analysis of Characteristics and Occurrence Background of the Tongliao $M5.3$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 242-247. (in Chinese)

[20] Keilis-Borok V I, Knopoff L. Bursts of Aftershock of Strong Earthquakes[J]. Nature, 1980, 238(P5744): 259-263.

(上接 597 页)

[10] 宋治平,尹祥础,陈学中.加卸载响应比的时空演变特征及其对地震三要素的预测意义[J].地震学报,1996,18(2):179-186.

SONG Zhi-ping, YI Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, et al. Time and Spatial Variation Characteristic of Loading-unloading Response Ratio and Three Essential Factors of Earthquake Forecast Significance[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(2): 179-186. (in Chinese)

[11] 曾小苹,续春荣,赵明,等.地球磁场对太阳风的加卸载响应与地震[J].地震地磁观测与研究,1996,17(1):49-53.

ZENG Xiao-ping, XU Chun-rong, ZHAO Ming, et al. The Load-unload Response of Geomagnetic Field to Solar Wind and Earthquake Prediction[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1996, 17(1): 49-53. (in Chinese)

[12] 谢凡,滕云田,胡星星,等.地磁站点的城市轨道交通干扰的小波抑制方法研究——以天津轨道交通干扰为例[J].地球物理学报,2011,54(10):2698-2707.

XIE Fan, TENG Yun-tian, HU Xing-xing, et al. Suppression of Magnetic Perturbation Caused by Urban Railway to Geomagnetic Observations Using the Wavelet Method——A Case Study of Tianjin Subway[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(10): 2698-2707. (in Chinese)

[13] 张建国,闫俊岗,王静,等.地磁加卸载响应比方法在地震预报中的应用[J].大地测量与地球动力学,2008,28(2):45-50.

ZHANG Jian-guo, YAN Jun-gang, WANG Jing, et al. Application of Geomagnetic Loading-unloading Response Ratio Method to Earthquake Prediction[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(2): 45-50. (in Chinese)

[14] 李伟,龚耀,赵文舟,等.地磁加卸载响应比方法在上海及其邻区地震研究中的应用[J].地震,2014,34(1):125-133.

LI Wei, GONG Yao, ZHAO Wen-zhou, et al. Application of Geomagnetic LURR Method in Seismic Studies in Shanghai and Its Adjacent Areas[J]. Earthquake, 2014, 34(1): 125-133. (in Chinese)

[15] 中国地震局监测预报司.地震参数——数字地震学在地震预报中的应用[M].北京:地震出版社,2003:73-74.

Department of Monitoring and Forecasting, China Earthquake Administration. Seismic Parameters: Application of Digital Seismology in Earthquake Prediction[M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 73-74. (in Chinese)