

王一咪, 陈大庆, 钟天任. 新丰江地区 $M \geq 3$ 地震震后序列特征[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 79–. [WANG Yimi, CHEN Daqing, ZHONG Tianren. Characteristics of Post-sequences of Earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang Area [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 79–]

新丰江地区 $M \geq 3$ 地震后序列特征

王一咪¹, 陈大庆², 钟天任²

(1. 广州南粤地震工程勘察有限公司, 广州 510070; 2. 广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 新丰江地区近年来有感地震频发, 为了震后应急的需要, 文中统计了1980年以来该区域 $M \geq 3$ 地震后序列的特征。得到以下结论: 该区域40次 $M \geq 3$ 地震后30天内仅1次发生比主震更大的地震, 其余震的衰减时长相比 $K-K$ 法给出的时间窗长要短很多。按照余震衰减的大森公式, 新丰江地区 p 值偏高。统计得到的这些规律以及拟合的曲线可以为我们在震后快速的对后续余震特征做出初步判断提供依据。

关键词: 新丰江地区 $M \geq 3$ 地震; 次大地震; 大森公式

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0079-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.10

Characteristics of Post-sequences of Earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang Area

WANG Yimi¹, CHEN Daqing², ZHONG Tianren²

(1. Guangzhou Nanyue Seismic Engineering Surveys Co., Ltd, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: In recent years, there have been frequent felt earthquakes in Xinfengjiang area. In order to meet the needs of post-earthquake emergency response, this paper analyzes the characteristics of post-earthquake sequences of earthquakes with $M \geq 3$ in this area since 1980. The conclusions are as follows: only one earthquake larger than the mainshock occurred within 30 days after 40 earthquakes with $M \geq 3$ in this area, and the attenuation time of aftershocks is much shorter than the time window given by the $K-K$ method. According to the Omori formula of aftershock attenuation, the p value in Xinfengjiang area is high. These laws obtained by statistics and fitted curves can provide a basis for rapid preliminary judgment of the characteristics of aftershocks sequence after the earthquake

Keywords: Earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang area; Secondary earthquake; Omori formula

0 引言

新丰江水库区在1962年3月19日发生6.1级地

震后一直中小地震不断, 2012、2013年在库尾的锡场又接连发生4.8、4.7级地震, 2023年2月11日在靠近大坝的源城区又发生了一次4.3级地震, 紧接着3月8日在靠近库尾的鱼坑又发生了4.5级地

收稿日期: 2023-04-10

作者简介: 王一咪(1988–), 女, 工程师, 硕士, 主要从事地震工程工作。

E-mail: 867036900@qq.com

通信作者: 陈大庆(1977–), 男, 高级工程师, 主要从事地震活动分析。

E-mail: gd_daqing@163.com

震。据统计自1980年以来共计发生过40次 $M \geq 3$ 地震(去除余震)。新丰江水库地区的地震作为我国一个典型的与水库蓄水有关的地震,对震前小震活动的特征研究和水库诱发地震,多年来有众多学者进行过多方面的研究^[1-2],对震时的活动特点和发生机制,也进行过很多讨论,多数集中在发震构造和成因等方面^[3-5]。另外,对余震活动也作了一些研究,水库地震余震活动的基本趋势是衰减过程,地震序列在其发生、发展的过程中具有一些区别于构造地震的特点,是由地应力和水库渗透压力等因素综合形成的^[6-7]。新丰江地区的地震序列以主余型为主,绝大多数序列最大余震均发生在震后30天内^[8-9]。

基于震后应急的需要,出现3级以上地震后,地震部门通常需要回答震后近期内会不会出现更大地震。按照 $K-K$ 法^[10]给出的余震时间窗长3~3.5级地震为8天,3.5~4.0级地震为12天,而诱发地震的余震通常衰减更快。为了统计的方便以及公众的理解,本文梳理出震后30天内出现的次大地震,这一时间实际已经突破了余震的时间窗长。另外,根据该区域的完整性震级 M_c 定义序列衰减到1天0次0.2级地震或者连续2天都只发生1次0.2级地震为余震的结束时间,本文统计了3级地震后余震的持续时间以及每日余震的频次衰减,得到了相应的拟合方程。这些基于统计得到的结果可以为后续该

区域出现类似震级地震的震后判断提供依据。

1 震后30天内区域次大地震震级和主震震级的关系

本文统计了1980年以来新丰江地区40次 $M \geq 3$ 级地震(去除余震)后30天内区域次大地震震级以及和主震的时间间隔(表1)。按照 $K-K$ 法给出的余震衰减时间窗,3~3.4级为8天,3.5~3.9级为12天,4.0~4.4级为23天,水库地震通常衰减得要更快。因此30天内的时长统计实际已经超出了新丰江水库区3级地震的余震衰减时间窗。但在出现3级以上地震后,作为分析部门需要统计近期内是否会出现更大地震,因此统一为30天内便于公众的理解有更实际的意义。

图1为震后30天内区域次大地震震级和主震震级的统计分布,图2为震级差柱状图分布,从中可以看到,40次 $M \geq 3$ 级地震后30天内仅在2023年2月11日的4.3级地震后在3月8日又发生了1次4.5级地震,后续地震震级高于前一个地震震级,其余39次在30天内都未发生比主震更大的地震。用地震序列类型的震级差判断方法,则70%的 M_1 (30天内次大地震)大于 $M_0-2.4$,小于 $M_0-0.6$ (M_0 为主震震级);25%的 M_1 大于等于 $M_0-0.6$,只有5%的 M_1 小于 $M_0-2.4$ 。

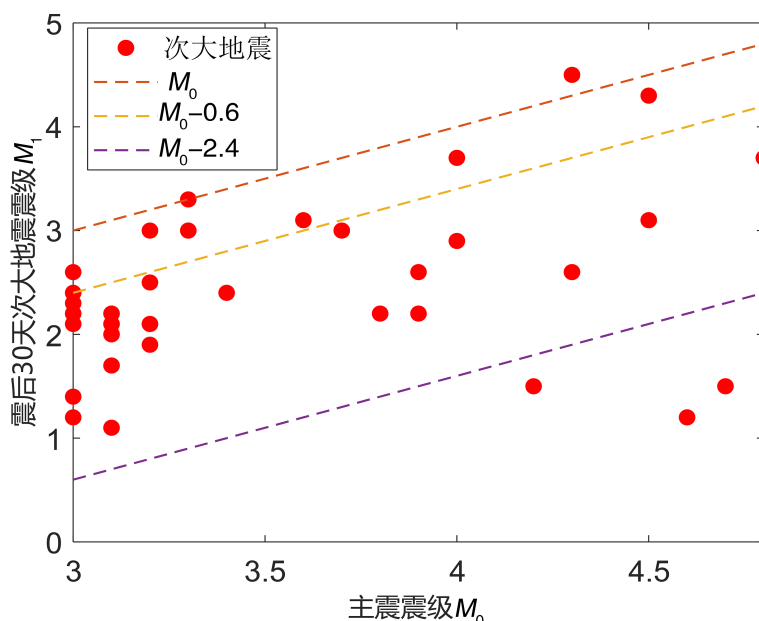


图1 新丰江地区1980年以来 $M \geq 3$ 地震后30天内次大震级和主震震级的关系

Fig.1 The relationship between the magnitude of the mainshock and the magnitude of secondary earthquake within 30 days after earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang area since 1980

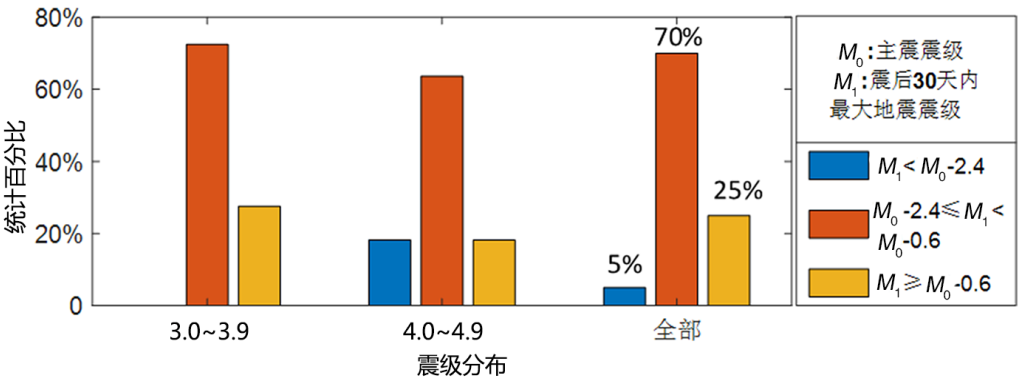


图2 新丰江地区 1980 年以来 $M\geq 3$ 地震后 30 天内次大震级和主震震级震级差分布柱状图

Fig.2 Histogram of magnitude difference between the main magnitude and sub-magnitude within 30 days after earthquakes with $M\geq 3$ in Xinfengjiang area since 1980

得到新丰江地区 $M\geq 3$ 地震后 30 天内最大地震震级与主震震级的统计关系为:

$$M_1 = 0.424\ 7\ M_0 + 0.914\ 6 \quad (1)$$

其中 M_1 为主震后 30 天内区域次大地震震级, M_0 为主震震级(下同)。

表1 新丰江地区 1980 年以来 $M\geq 3$ 地震后 30 天内次大地震震级及与主震时间差

Table 1 The magnitude of the secondary earthquake within 30 days after the earthquakes with $M\geq 3$ in Xinfengjiang area since 1980 and its time difference with the main earthquake

主震发震时间/ 年-月-日	主震震级/ M	30 d 内最大地震 震级/ M	间隔时间/ d	主震发震时间/ 年-月-日	主震震级/ M	30 d 内最大地震 震级/ M	间隔时间/d
1981-05-04	4.3	2.6	00.04	2002-12-13	3.4	2.4	01.83
1981-06-08	3.8	2.2	21.16	2012-02-16	4.8	3.7	01.70
1981-07-16	3.0	2.3	09.37	2012-08-31	4.0	3.7	01.56
1981-08-17	3.0	2.4	14.13	2013-01-06	3.2	2.5	17.61
1986-09-15	3.9	2.2	07.79	2013-02-22	4.7	1.5	10.86
1987-09-15	4.5	3.1	18.31	2013-07-30	3.0	2.2	20.10
1989-11-26	4.5	4.3	00.03	2014-04-25	3.9	2.6	28.85
1991-09-21	4.6	1.2	06.57	2014-07-11	4.0	2.9	11.07
1997-03-02	3.2	3.0	26.82	2015-05-15	3.3	3.0	29.60
1997-03-28	3.0	1.4	15.94	2015-06-13	3.0	2.1	00.13
1997-06-17	3.3	3.0	15.22	2016-03-27	3.0	1.2	23.82
1997-07-02	3.0	2.4	24.72	2017-02-28	3.0	2.1	21.91
1997-08-11	3.1	2.2	27.47	2017-08-13	3.1	2.1	01.64
1997-10-03	3.3	3.3	00.00	2019-04-21	3.0	2.2	29.18
1998-06-24	3.2	2.1	03.18	2021-04-02	3.7	3.0	28.94
1998-11-04	3.2	1.9	01.71	2021-05-01	3.0	2.6	08.84
1999-03-25	4.2	1.5	02.81	2022-02-07	3.1	1.1	24.53
1999-08-20	4.5	3.1	13.04	2022-12-21	3.6	3.1	22.31
1999-12-18	3.1	2.0	06.08	2023-01-12	3.1	1.7	00.09
2002-03-11	3.2	2.1	17.27	2023-02-11	4.3	4.5	27.77

2 30天内次大地震与主震时间间隔分布特征

图3为40次 $M \geq 3$ 地震后区域次大地震时间间隔与主震震级的关系,图中可以看到次大地震在时间上集中在两个区域,右下区域是时间较短的区

域,应该反映的是余震区域,说明在此阶段余震的活动水平高于区域的本底活动水平,因此次大地震为主震的余震。右下区域的包络线也一定程度上反映了该区域余震的衰减时间。而左上区域在时间上距离主震较长,说明在此阶段余震已经基本衰减完,以区域本底地震活动为主。

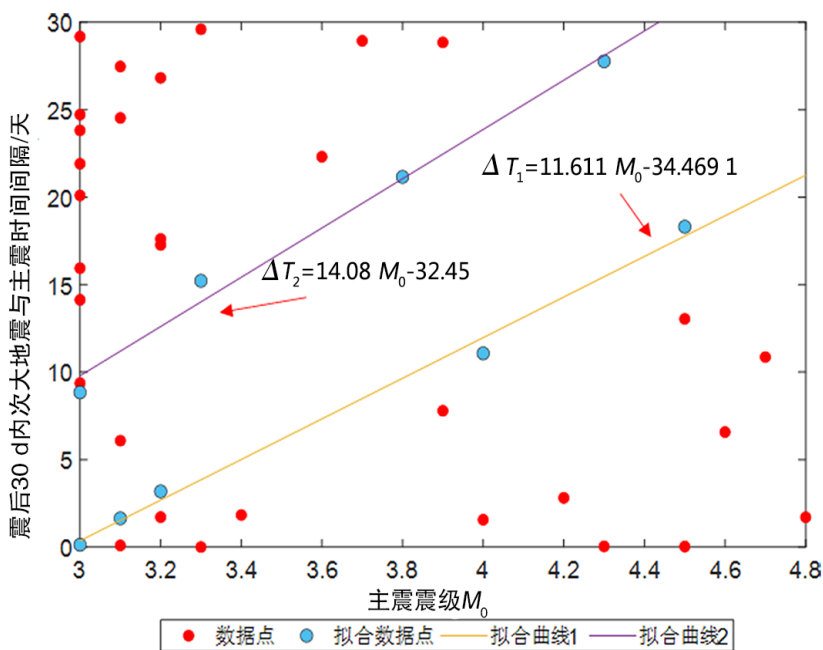


图3 新丰江地区1980年以来 $M \geq 3$ 地震后30 d内次大震和主震时间间隔

Fig.3 The time interval between the mainshock and the secondary earthquake within 30 days after the earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang area since 1980

图中两条包络线拟合方程如下:

$$\Delta T_1 = 11.611 M_0 - 34.469 \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = 14.08 M_0 - 32.45 \quad (2)$$

上式中下包络线 ΔT_1 一定程度上反映了余震的衰减时间, ΔT_2 一定程度上反映了本底活动开始强于余震活动的时间。

3 余震衰减时间分析

3.1 区域完整性震级

由于本文中涉及到1980年以来3级以上余震频次,因此需要确定新丰江地区的完整性震级 M_c ,本研究中采用定性评估的“地震一序号法”,定量评估的MAXC方法和拟合度分别为90%和95%的GFT方法^[11],研究 M_c 随时间的演化特征^[12]。“地震一序号法”按地震发生时间的先后顺序排序,考察不同震级的地震数密度分布来定性分析 M_c ,其中

地震数密度较大的位置对应的震级即是最小完整性震级。由于存在不同方法同时使用,结果不唯一情况的优选问题,设定优先级为GET-95%>GET-90%>MAXC,选取可计算且优先级高的 M_c -best为最终结果。图4给出的结果,新丰江地区的 M_c 基本稳定在 $M0.2$,只有个别时间段稍高,基本不影响本研究的结果,因此后续选用最低完整性震级 M_c 为 $M0.2$ 。

上图为地震密度分布,下图为震级一序号分布,图中各曲线分别对应MAXC方法,拟合度分别为90%和95%的GET-95%>GET-90%>MAXC的优先选取“最佳” M_c 的 M_c -best结果

3.2 新丰江地区余震衰减的时间

图5为1980年以来11次4级以上地震震后 $M0.2$ 以上地震的日频次。从中可以看到新丰江地区的余震序列衰减较快,余震活动的持续时间较短。本文根据该区域的完整性震级 M_c 定义序列衰

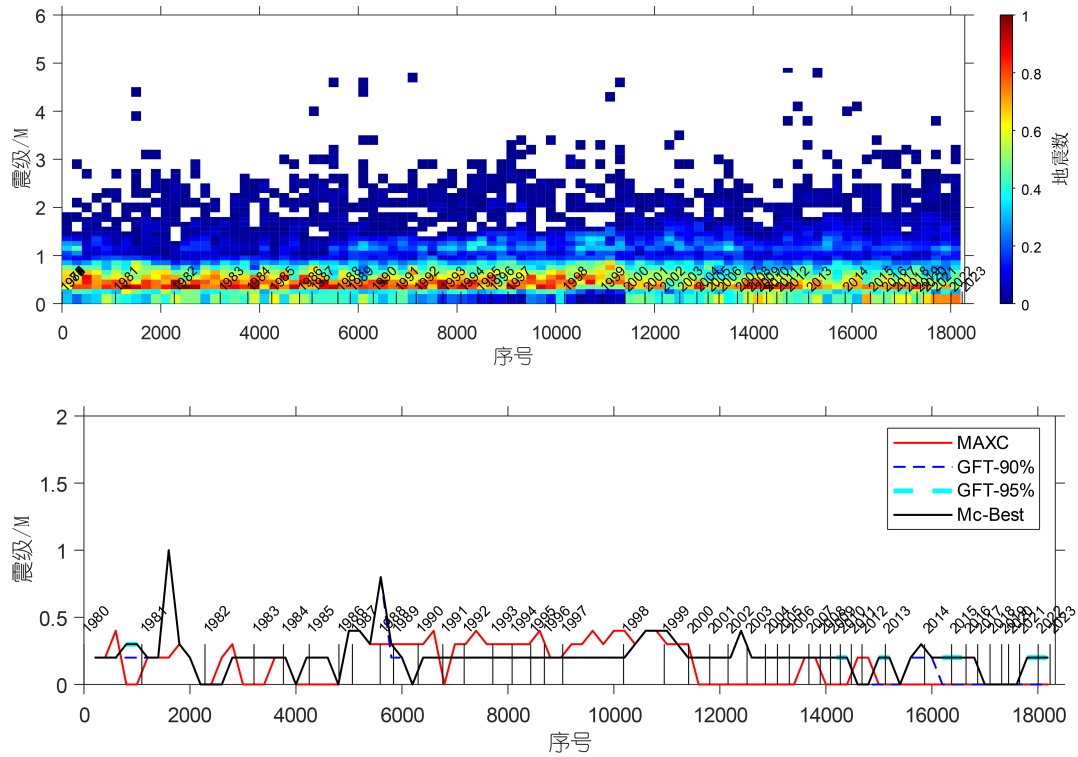


图4 新丰江地区最小完整性震级 M_c 随时间的变化

Fig.4 Variation of minimum integrity magnitude M_c with time in Xinfengjiang area

减到1天0次0.2级地震或者连续2天都只发生1次0.2级地震为余震的结束时间。图6为余震衰减时长与主震震级的关系,随着主震震级的增大,余震持续的时间增长,但也基本维持在图中两条拟合线之间。

$$\Delta T_3 = 4.62 M_0 - 9.196 \quad (4)$$

$$\Delta T_4 = 1.419 M_0 - 3.581 \quad (5)$$

上式中 ΔT_3 为最长衰减时长, ΔT_4 为最短衰减时长。

表2列出了按照拟合线得到的新丰江地区3级以上地震余震的最短、最大持续时间和 $K-K$ 法余震持续时间的对比,可以看到新丰江地区余震的持续时间显著小于其它地区,这也符合水库地震余震衰减的规律。

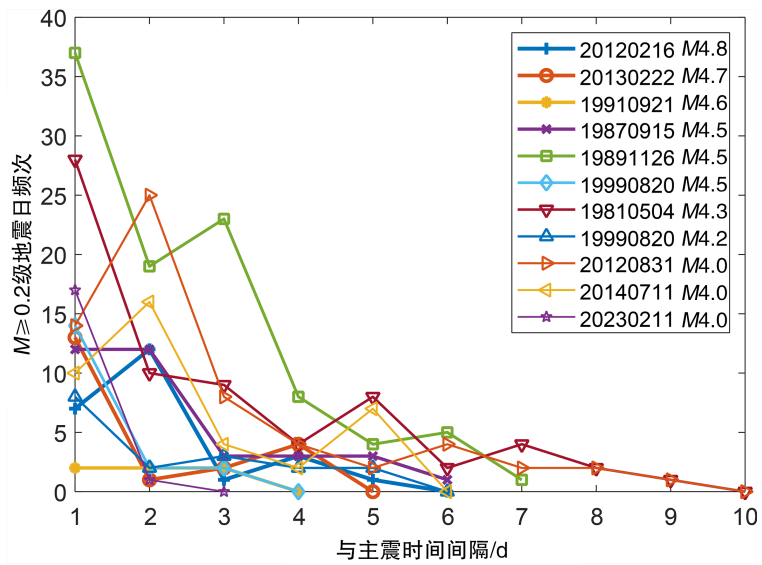


图5 新丰江地区1980年以来 $M \geq 4$ 地震后余震日频次

Fig.5 The daily frequency of aftershocks after earthquakes with $M \geq 4$ in Xinfengjiang area since 1980

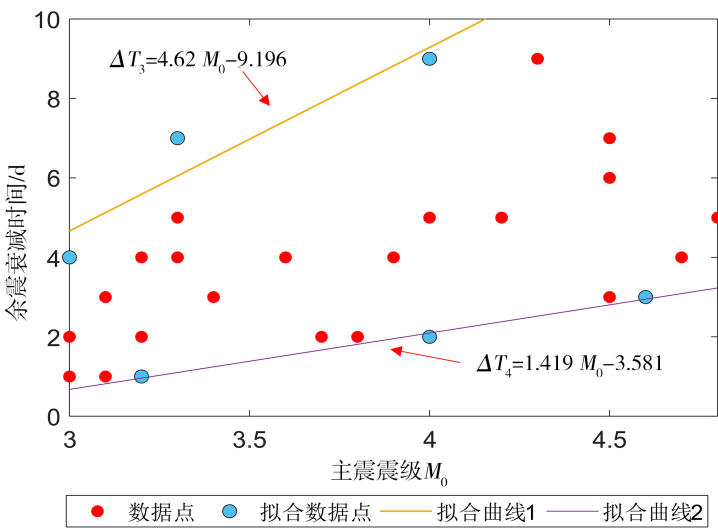


图6 余震衰减时间与主震震级的关系

Fig.6 Relationship between aftershock attenuation time and magnitude of main shock

表2 新丰江地区余震衰减时长与K-K法余震时间窗长比较

Table 2 Comparison between the aftershock attenuation time and aftershock time window length by K-K method in Xinfengjiang area

震级/M	最低衰减时间/d	最高衰减时间/d	K-K法的余震窗长/d
3.0	1.0	4.0	8
3.5	1.6	6.5	12
4.0	2.3	9.0	23
4.5	2.9	11.5	46
5.0	3.5	14.0	92

4 余震每日频次衰减

按照 Utsu^[13]提出的修改的大森公式

$$n(t) = K(t + c)^{-p} \tag{6}$$

图7为新丰江地区 $M \geq 3$ 地震后每日的余震频次拟合曲线, $n(t)$ 为 $M \geq 0.2$ 地震日频次, K, c, p 为常数, 拟合得到新丰江地区的 $K=15.65, c=0.49, p=1.264$ 。王碧泉等^[14]指出中国大陆东部多数大地震($M \geq 7$)的 p 值较低(0.56~0.99)。赵志新等^[15]利用点过程最大似然估计对中国大陆 $M \geq 5$ 的32次地震的余震时间衰减特征进行定量分析, 发现中国东部、南部、北部 p 值的平均值约为0.91, 而新丰江地区 p 值偏高, 这可能与主震震级较低并且本底地震活动水平较高有关。

5 讨论和结论

本文统计了1980年以来新丰江地区40次 M

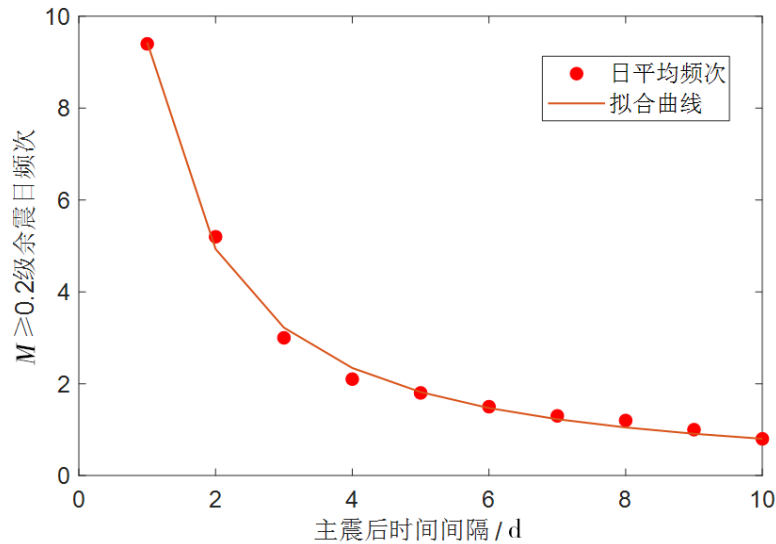
≥ 3 级地震后序列的特征, 得到以下结论。

(1)主震后30天内仅1次发生更大地震, 70%的次大地震介于 $M_0-2.4$ 和 $M_0-0.6$ 之间。次大地震和主震的震级满足拟合公式 $M_1=0.424\ 7, M_0+0.914\ 6$ 。

(2)按照定义序列衰减到1天0次0.2级地震或者连续2天都只发生1次0.2级地震为余震的持续时间, 则最短衰减时长满足拟合公式 $\Delta T_4 = 1.419\ M_0 - 3.581$, 最长衰减时长满足拟合公式 $\Delta T_3 = 4.62\ M_0 - 9.196$ 。和K-K法给出的时间窗长相比较, 新丰江地区的余震衰减时间要短得多。

(3)按照修改的余震衰减的大森公式, 拟合得到新丰江地区的 $K=15.65, c=0.49, p=1.264$, 新丰江地区 p 值偏高, 这可能与主震震级较低并且本底地震活动水平较高有关。

通过以上统计得到的余震序列特征以及拟合公式, 我们可以在震后快速得到相应震级主震后30天内的次大地震, 余震的持续时间以及每日的

图7 新丰江地区 $M \geq 3$ 地震余震日频次衰减Fig.7 Daily frequency attenuation of aftershocks of earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang area

频次衰减。为震后对余震序列的快速判断提供支持,但统计分析中也发现部分余震序列特征参数较为离散,这可能和小区域的构造特征以及受库水位的影响有关,期待有进一步的研究能揭示其中的原因。

致谢:本文“地震—序号法”确定区域完整性震级采用的是蒋长胜教授提供的程序。

参考文献

- [1] 陈大庆,柴荣建.新丰江水库显著地震前小震序列特征及应用研究[J].地震,2015,35(04):119-126.
- [2] 秦嘉政,刘丽芳,钱晓东.水库诱发地震活动特征及其预测方法研究[J].地震研究,2009,32(02):105-113.
- [3] 邵叶,刘特培,刘吉平.2012和2013年广东新丰江锡场2次 $M_s 4.8$ 地震发震构造的确定[J].地震,2016,36(02):132-14.
- [4] 王力伟,吴国瑞,黄柳芳.CAP方法反演新丰江锡场地区 $M_L 4.0$ 级以上地震震源机制解[J].华南地震,2018,38(03):1-8.
- [5] 陈大庆,杨马陵,蒋海昆,等.广东新丰江水库地震垂向引潮力的调制作用研究[J].华南地震,2011,31(02):29-36.
- [6] 丁原章,曾宪译,陈益明.新丰江水库区诱发地震的余震活动[J].地震地质,1982(01):23-30.

- [7] 沈崇刚,陈厚群,张楚汉,等.新丰江水库地震及其对大坝的影响[J].中国科学,1974(02):184-205.
- [8] 万永芳,叶东华,陈大庆.广东新丰江地区地震研究[J].华南地震,2008,28(02):59-66.
- [9] 万永芳,杨马陵.新丰江水库地震序列的分段研究[J].华北地震科学,2011,29(04):27-33.
- [10] Keilis-Borok V I, Knopoff L. Bursts of aftershock, long-term precursors of strong earthquakes[J]. Nature, 1980 (283): 259-263.
- [11] Wiemer S, Max W. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(4): 859-869.
- [12] 李志海,蒋长胜,黄瑜,等.新疆地区地震目录最小完整性震级和台网科学布局研究[J].地震学报,2011,33(06):763-775.
- [13] Utsu T. Magnitudes of earthquakes and occurrence of their aftershocks[J]. Zisin (Ser), 1957, 2(10): 35-45 (in Japanese).
- [14] 王碧泉,王春珍.余震序列的时空特征[J].地震学报,1983(04):383-396.
- [15] 赵志新,尾池和夫,松村一男,等.中国大陆性地震的余震活动的 p 值[J].地震学报,1992(01):9-16+130.