

刘锦, 陈大庆, 谭争光, 等. 新丰江库区晚期地震活动与库水位关系研究[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 136–141. [LIU Jin, CHEN Daqing, TAN Zhengguang, et al. Study on the Relationship Between Late Seismic Activity and Reservoir Water Level in Xinfengjiang Reservoir Area[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 136–141]

新丰江库区晚期地震活动与库水位关系研究

刘 锦, 陈大庆, 谭争光, 陈贵美

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 统计分析了1980年以来新丰江水库水位变化与库区不同区域、库区3级以上地震、小震频次变化的对应关系。库区地震活动统计结果显示:震级和库水位有一定程度负相关性。2012年以来鱼坑、锡场等区域易发生在相对高水位时间段, 而大坝附近的地震相对容易发生在低水位时间段。库区3.5级以上地震更容易发生在水位卸载时间段内。库区水位高于103 m和小震频度增加的发生存在一定的关联性。

关键词: 库水位; 地震活动性; 水库地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0136-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.17

Study on the Relationship Between Late Seismic Activity and Reservoir Water Level in Xinfengjiang Reservoir Area

LIU Jin, CHEN Daqing, TAN Zhengguang, CHEN Guimei

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: This paper statistically analyzes the corresponding relationship between the water level change of Xinfengjiang Reservoir and the frequency change of earthquakes with $M \geq 3$ and small earthquakes in different parts of the reservoir area and reservoir area since 1980. The statistical results of seismic activity in the reservoir area show that there is a certain degree of negative correlation between earthquake magnitude and water level. Since 2012, earthquakes in Yukeng, Xichang and other areas are prone to occur in relatively high water level periods, while earthquakes near the dam are relatively prone to occur in low water level periods. Earthquakes with $M \geq 3.5$ in the reservoir area are more likely to occur during the unloading period of water level. There is a certain correlation between the water level in the reservoir area higher than 103 m and the increase in the frequency of small earthquake.

Keywords: Reservoir water level; Seismic activity; Reservoir earthquake

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 广东省科技计划项目(2019B020208014); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311022010)联合资助。

作者简介: 刘锦(1970-), 女, 高级工程师, 主要从事地震预报研究。

E-mail: 1548173006@qq.com

0 引言

库水的载荷和渗透作用在水库诱发地震中起着非常重要的作用,水库地震缘于流体渗透以及外加载荷的共同作用。广东新丰江水库区在1962年发生6.1级地震后至今仍然是小震活动不断,2023年以来水库区接连发生4级左右地震,引起较为广泛的社会关注。关于新丰江水库区域的地震活动前人从不同角度做了很多的研究工作,丁原章^[1-3]对新丰江水库诱发地震的构造条件、库区地震活动、地壳形变等做了详细研究;于海英^[4]利用新丰江水库的近场地面运动资料研究了水库地震的地震动特征;王小娜等^[5]利用新丰江水库周围14个台站记录的Pg波、Sg波震相数据研究库区波速比变化特征。随着数字化地震观测技术的诞生和应用,进一步推进了水库地震的研究深度。藏绍先等^[6]通过对新丰江水库地震活动过程系列特征的研究,结合库区断层渗透结构特征,提出库区地震主要成因为库水渗透。郭贵安等^[7]通过研究库区小震震源机制解,指出因渗水新丰江原有北西向构造面上的抗剪强度弱化,快速蓄水在库区地壳内积累了较大能量,引发6.1级主震以及一系列前震。

通常在水库蓄水的前期,库水位的变化和地震活动关系密切^[5]。新丰江水库自从1959年10月下闸蓄水,1962年3月19日发生6.1级地震后的1962—1964年为新丰江水库主要释放阶段,该阶段水库水位与地震活动的强弱,有较好的关系。水位快速升降后,通常都可以触发出一些强度较大的地震,特别是水位上升阶段,随着水位的不断升高,地震的强度也逐渐增大。1965—1969年为余震释放阶段,该阶段水库水位的升降与所发生地震的强度显然无关。1967年的2次4级地震既未发生在高水位,也未发生在水位快速上升的时段。1970年至今,新丰江水库的地震活动进入了晚期余震释放阶段。特别是2012年以来,之前地震较少的锡场和鱼坑等地接连发生了多次4~5级地震,意味着新丰江地区的地震活动出现了新的变化特征。

为深入分析新丰江水库水位变化与地震活动的关系,本文统计了1980年以来新丰江库区3级以上地震和0.2级以上地震频次变化与库水位及变化速率的关系。研究结果既有助于理解注水诱发

地震的机制,也可为水库区域的震情跟踪提供参考。

1 研究区域与数据选取

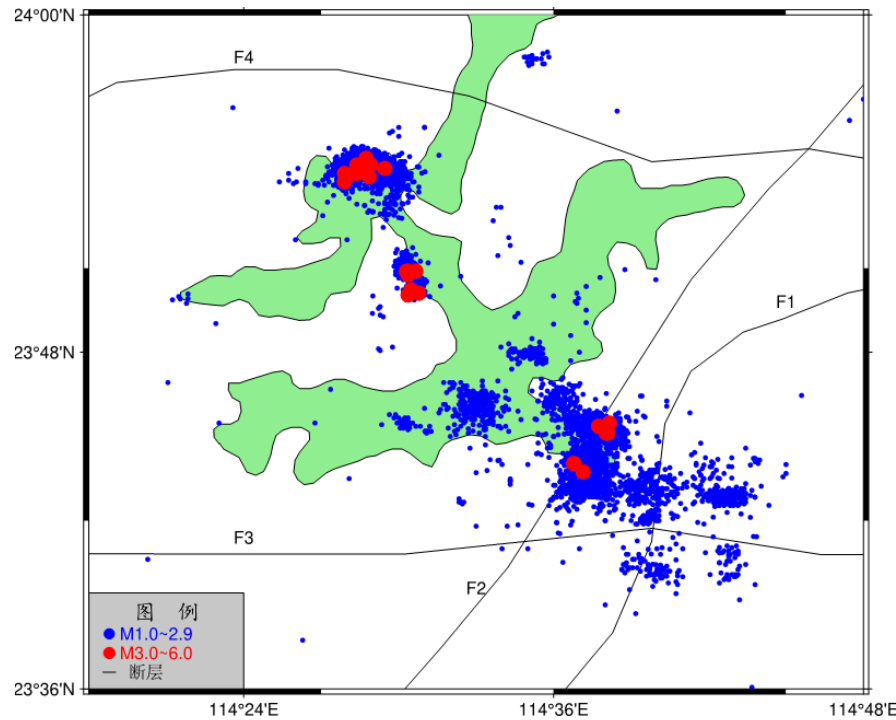
河源地区的新丰江水库主要座落在燕山期花岗岩体上,岩体侵入到古生界和中生界沉积岩系中,岩体东侧与晚白垩纪—第三纪断陷盆地断层接触,呈NEE向延伸,长达数百公里,受到多条不同走向的断裂切割,NE—NNE向断裂是地表最醒目的断裂构造,规模较大的有河源断裂和人字石断裂。NEE向断裂虽然在地表未形成规模巨大的断裂,但通过航空磁测和区域重力资料研究,在地壳中下层,NEE向构造则属本区的最主要构造,如南山—坳头构造带和凹背—上围断裂带(图1)。

数据来自广东省地震监测台网1980年以来地震目录,研究区域选取北纬 $23.6^{\circ} \sim 24.0^{\circ}$,东经 $114.3^{\circ} \sim 114.8^{\circ}$ 。

2 大坝水位与地震活动关系研究

2.1 库水位以及库水位变化速率和3级以上地震的关系

1980年1月1日至2023年3月9日新丰江水库区域共发生52次3级以上地震(包含余震),其中4级以上地震13次, $M-T$ 图(图2)显示新丰江地区地震呈成组活动特征,地震活动相对较弱时期为1986—1997年,2001—2011年,2016—2019年。表1中列出了13次4级以上地震的发震时间、震级以及发震当天库水位的高程。从中可以看出,2000年之前的4级以上地震都发生在104 m以下(图3)水位相对较低的时间段。而2012年之后4级以上地震都发生在104 m水位以上,水位相对较高的时间段。这种差异可能和两个时间段发震的位置不同有关,2000年之前的4级地震都是发生在大坝附近的区域,该区域自1962年6.1级地震以来中小地震活动不断,而2012年之后4级地震多发生在库中的鱼坑、库尾的锡场以前地震并不多的区域。图4为地震震级和库水位高度的关系,阴影部分表示4级以上地震,对应的库水位在110 m之下,统计表明地震震级和库水位高度有一定程度的负相关性。



F1:河源断裂;F2:人字石断裂;F3:大坪—岩前断裂;F4:南山—坳头断裂

图1 新丰江地区断裂和地震分布图

Fig.1 Distribution map of faults and earthquakes in Xinfengjiang area

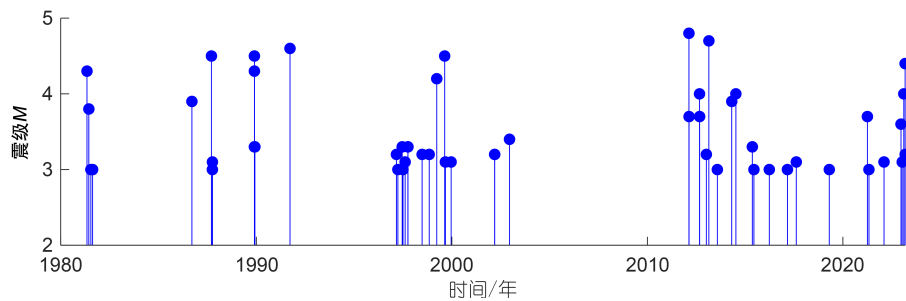


图2 新丰江地区1980年以来3级以上地震M-T图

Fig.2 M-T diagram of earthquakes with $M \geq 3$ in Xinfengjiang area since 1980

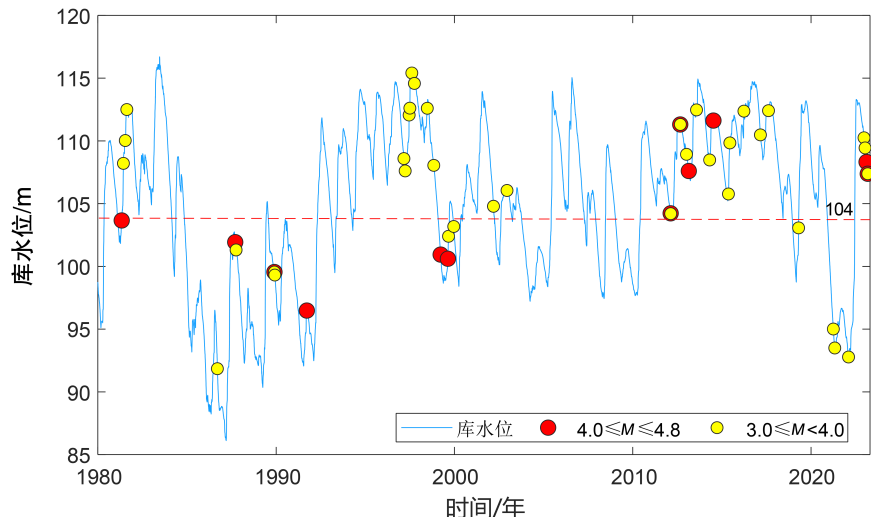


图3 1980年以来新丰江地区3级以上地震和库水位高程的关系

Fig.3 Relationship between earthquakes with $M \geq 3$ and reservoir water level elevation in Xinfengjiang area since 1980

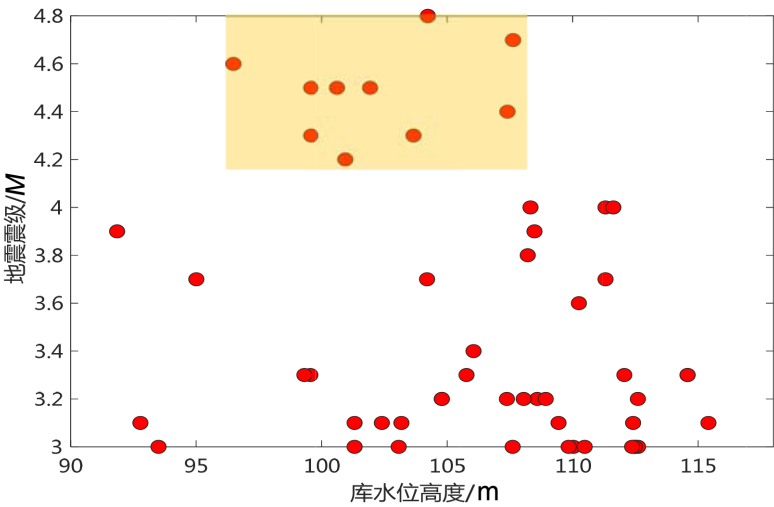


图4 库水位和地震震级的关系

Fig.4 Relationship between reservoir water level elevation and earthquake magnitude

表1 $M \geq 4$ 地震震级和库水位高程统计表

Table 1 Statistical table of magnitude and reservoir waterlevel elevation for earthquakes with $M \geq 4$

主震发震时间/年-月-日	主震震级/ M	库水位高程/m	主震发震时间/年-月-日	主震震级/ M	库水位高程/m
1981-05-04	4.3	103.66	2012-02-16	4.8	104.23
1987-09-15	4.5	101.93	2012-08-31	4.0	111.31
1989-11-26	4.5	99.55	2013-02-22	4.7	107.6
1989-11-26	4.3	99.55	2014-07-11	4.0	111.62
1991-09-21	4.6	96.48	2023-02-11	4.3	108.32
1999-03-25	4.2	100.94	2023-03-08	4.5	107.38
1999-08-20	4.5	100.61			

库水位的快速变化有可能引起地震的发生^[5], 本文进一步研究了新丰江库区3级以上地震前库水位变化的特征。图5展示了4级以上地震(不包含余震)前10天库水位的日变化曲线。从中可以看到10次地震中有7次发生在水位卸载区间, 只有3次发生在加载区间, 并且震前10天这种变化是持续的, 在临震的前几天都几乎未见水位变化速率的

提升。图6为1980年以来52次3级以上地震前10天和前30天库水位变化幅度。其中20次3.5级以上地震(阴影部分)中有14次发生在水位卸载区间占70%, 只有4次发生在水位加载区间, 另外有2次库水位几乎没有变化。说明水位卸载时间段是相对高震级地震的优势时间段。

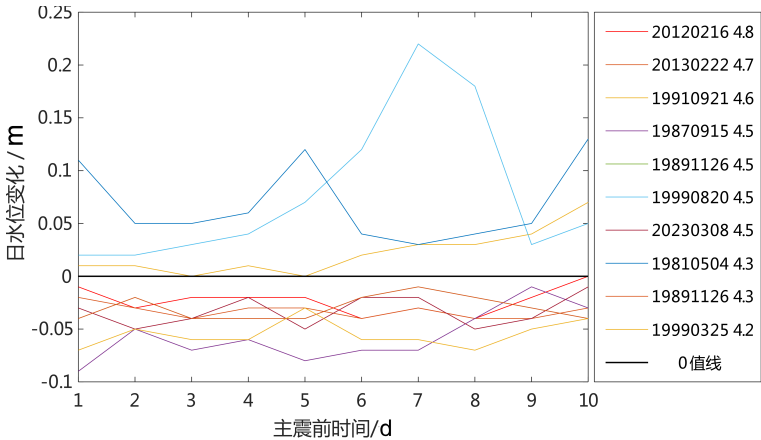


图5 1980年以来 $M > 4$ 地震震前10天水位的日变化

Fig.5 Daily variation of water level in 10 days before earthquakes with $M > 4$ since 1980

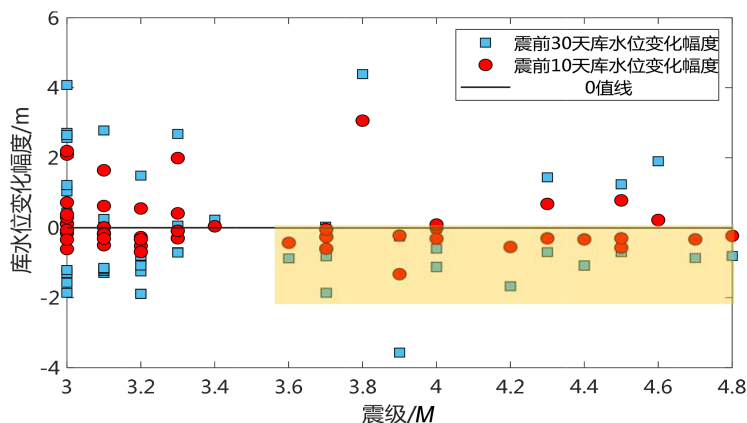


图6 库水位变化幅度和地震震级的关系

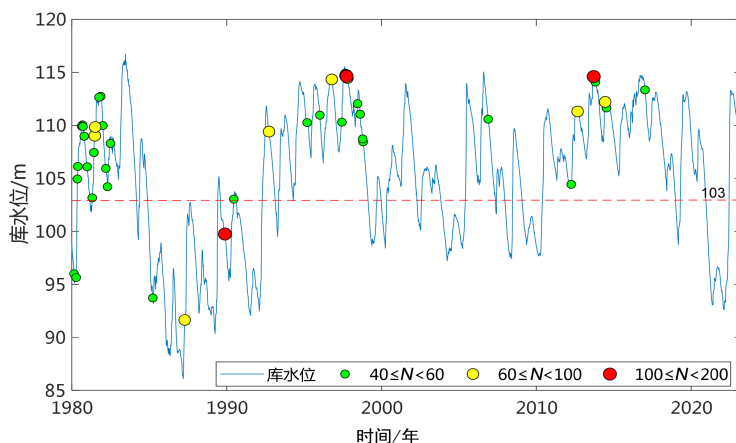
Fig.6 Relationship between variation amplitude of reservoir water level and earthquake magnitude

2.2 库水位和小震活动的关系

新丰江水库蓄水至今中小地震不断,新丰江库区台网较为密集,根据相关文献^[5,8]地震最小完备震级可达 $M_c=0.2$ 。图7中统计了1980年以来新丰江库区10日地震累积0.2级以上地震频次和库水位的关系。10日地震累积频次高于40次的共计有46次,其中有41次发生在水位103 m以上,占比89.1%,而水位在此区间的时间占比为66.3%。说明高水位更容易引起小震频度的增加。

2.3 库水位和小震平静的关系

新丰江库区经常会出现连续多天小震活动平静,本文统计了1980年以来新丰江库区共计出现过22次 $M \geq 0.2$ 地震平静超过15天,主要集中在2000年以后。其中平静时间超过20天的有8次,最长平静时间为32天。图8显示的是这22次超长平静和库水位的关系,图8统计了平静时间长短与平静时间段内库水位的变化。从以上统计上看,新丰江库区小震的平静与库水位高低,以及库水位的变化没有直接的关联。

图7 库水位和10天 $M \geq 0.2$ 地震累积频次的关系Fig.7 Relationship between reservoir water level elevation and the cumulative frequency of earthquakes with $M \geq 0.2$ in 10 days

3 讨论与结论

新丰江库区自1959年蓄水以来,前期流体渗透导致的裂隙或断层强度降低,库区的地震活动水平和库水位的变化有着较为显著的相关性。根据前人研究成果,水库区的水文地质结构是水库诱发地震的制约因素^[9],水文地质结构是指断

层渗透结构和岩体渗透稳定性的组合,两者的组合形式对孔隙压力变化下短促的力学响应具有重要影响。2013年钟羽云引入模糊数学方法^[10],定义水库水位从属函数,结合水库地震的流体扩散机制假设,得出新丰江水库蓄水初期水位是影响库区地震活动的主要外因,影响时间为6年。这与本文从库水位变化、水位速率变化等方面的分析

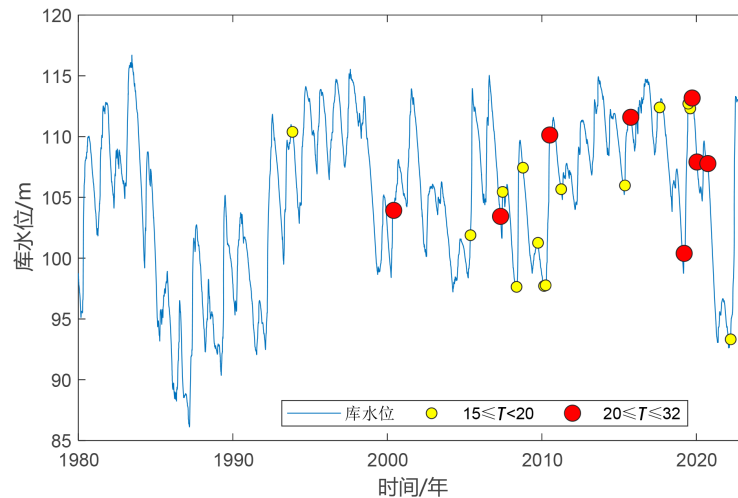


图8 地震平静与库水位高程的关系

Fig.8 Relationship between seismic calm period and reservoir water level elevation

得出1980年以来库水位变化与库区地震活动的关系相关性不大是一致的。

2014年蒋海昆^[11]结合微震活动的流体作用强度检测及孔隙压扩散模拟,以三峡库区微震活动为例,讨论了不同时期水库地震活动主要影响因素,蓄水后期由于流体渗透引起的孔隙压力变化变化趋于零,在新的流体平衡条件下,库水位加卸载过程导致的裂隙或断层面上的应力变化,成为库区微震活动的主要影响因素。通过研究1980年以后新丰江库水位和微震活动关系,认为新丰江库区水位高于103 m和小震频次的增加有一定的关联性,但小震的平静和库水位无显著关联性。这种特征可能是由于水的渗流和有效围压的影响。

新丰江高水位和库区3级以上地震无明显关联性,相反震级和水位高低有一定程度负相关性。2012年以来新出现的地区如鱼坑、锡场等区域易发生在相对高水位时间段。而大坝附近的地震相对容易发生在低水位时间段。说明经过多年库水位的载荷以及渗透作用可能会引起一些新的区域的地震,这些区域的地震可能对库水位载荷的作用更加敏感。

新丰江库区3.5级以上地震更容易发生在水位下降时间段内,并且在临震前的10天左右未见水位的快速变化。水库卸载阶段地震活动增强,可能是由于过剩孔隙压力造成瞬时破裂引起的,由此可见,水库卸荷阶段的地震活动更值得关注。

参考文献:

[1] 丁原章. 中国的水库诱发地震[J]. 华南地震, 1989, 9(1): 64-72.

[2] 丁原章, 常宝琦, 肖安予, 等. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989.

[3] 丁原章, 潘建雄, 肖安予, 等. 新丰江诱发地震的构造条件[J]. 地震地质, 1983, 5(3): 63-74.

[4] 于海英, 公茂盛, 金波, 等. 水库地震的地震动特征[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 188-193.

[5] 王小娜, 刘锦. 广东新丰江库区波速比变化特征研究[J]. 防灾减灾学报, 2017, 33(4): 12-18.

[6] 藏绍先. 水的渗透作用及新丰江水库地震的特点和机制[J]. 地震地质, 1983, 5(2): 59-69.

[7] 郭贵安, 刘特培, 秦乃刚, 等. 新丰江水库1961—1999年小震综合机制解分析结果[J]. 地震学报, 2004, 26(3): 261-268.

[8] 解孟雨, 孟令媛. 推定最大余震震级法在南北地震带的应用[J]. 地震研究, 2022, 45(3): 424-433.

[9] 易立新, 王广才, 李榴芬. 水文地质结构与水库诱发地震[J]. 水文地质工程地震, 2004(02): 29-32.

[10] 钟羽云, 周昕, 张帆. 水库水位变化与地震活动关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 35-40.

[11] 蒋海昆, 宋金, 贾若, 等. 不同时期水库地震活动主要影响因素讨论[J]. 地震, 2014, 34(1): 13-23.