

# 福建古田水口库区 $M_L$ 4.8 震群 分析与水库诱发地震探讨\*

吴绍祖, 陈 光, 丁学仁, 袁丽文

(福建省地震局, 福州 350003)

**摘要:** 阐述了水口库区及邻近地区的地震地质构造特征和库区蓄水前后的地震活动变化特点。重点分析了水库蓄水以来发生的最大地震——古田  $M_L$  4.8 地震序列, 并对库区地质与水文环境条件、诱发地震成因、机理等进行了研究。结果表明: 水口库区地震与水库蓄水有直接关系, 诱发地震震中主要集中在古田县水口镇湾口—前洋一带, 范围约  $13 \text{ km}^2$ 。库区地震活动还将持续较长时间, 且库区水位的升降与地震之间的相关性将越来越弱。最后对水口库区地震预测方法和最大震级进行了阐述。

**关键词:** 诱发地震; 水口库区; 地震活动; 地震预测

**中图分类号:** P315.75

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2010)01-0025-06

## 0 引言

水口水库位于福建省闽江干流上, 地处闽江中游峡谷地带。闽江径流量大, 落差集中, 水能资源丰富。库区坝址位于闽清县西北  $14 \text{ km}$  处, 水域长  $99.6 \text{ km}$ , 控制流域面积约  $52\,438 \text{ km}^2$ , 为一狭长的河道型水库。水库大坝高  $101 \text{ m}$ , 正常水位  $65 \text{ m}$ , 容量为  $26.1 \text{ 亿 m}^3$ , 电站装机容量为  $140 \text{ 万 kW}$ , 是目前我国东南地区最大的水力发电站。

截止到 2008 年 10 月 31 日, 水口水库建成以来库区发生的最大地震为 2008 年 3 月 6 日古田  $M_L$  4.8。水口水库建成对福建省经济的繁荣做出了很大贡献, 也由于诱发地震及次生灾害, 危及人民群众生命财产安全而受到政府的高度重视。现阶段水库诱发地震的成因、预测技术思路、防灾对策和水库诱发地震危险性评价工作受到了社会各界的关注。本文以水口水库地震活动现状来探讨库区环境、库区诱发地震成因与趋势等问题。

## 1 水口库区地震地质构造特征

水口库区地质岩性以火山岩、花岗岩为主。库区内分布有多处温泉, 如古田汤兜以及闽清梅

埔、汤下等地, 均为直接出露地表的花岗岩裂隙中溢出的中、低温温泉点, 说明该区存在地下深处至地表的通道。库区内发育多组构造, 是多次区域构造运动的结果。从区域构造特征和闽江地貌发育的卫星图片上来看, 库区线性构造影像清晰。最新勘查结果表明: 库区位于 NNE-NE 向的政和—海丰断裂带和福安—南靖断裂带之间, 水库地震集中区及其附近有 NE 向的湾口断裂 ( $F_2$ ), NS 向的下双坑断裂 ( $F_3$ ) 和 NW 向的闽江断裂 ( $F_6$ ) 等。库区另有多条斜列式断层和挤压破碎带, 地表显露断裂多以压扭性为主。库区主要以 NE 和 NNE 向构造为主, 但也与近 NS 向断裂交叉成为复合构造 (图 1)。库区内自第四纪以来, 特别是晚第四纪以来活动断裂因受局部应力场作用影响显著, 积累了较强构造应力, 从地质条件分析这有利于水的诱发机制。当水渗透到地壳内一定深度, 会引起断裂结构面间的孔隙压力增加, 这有利于岩体沿裂隙错动, 还能扩大和加深已存在的裂隙。构造岩软化削弱了结构面的抗滑力, 因而不需要较强的区域构造应力也可引发断裂位移释放应变能而发生地震。水库地震往往是多种诱因综合作用的结果, 而地质构造环境、构造裂隙中孔隙压力和库区特殊地质背景的作用尤为重要 (彭美凤等, 1997; 毛玉平等, 2004; 林松建等, 2007a)。

\* 收稿日期: 2008-12-08.

基金项目: 福建省地震局 2008 年度科研项目基金资助.



古田  $M_L4.8$  地震序列活动衰减缓慢，持续近 7 个月（图 3）。测震学方法的分析结果认为该序列后续地震活动将持续较长时间，活动水平仍会有起伏。

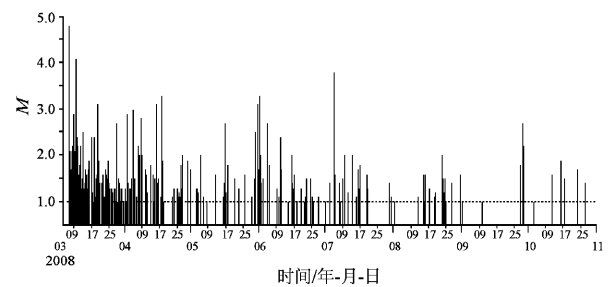


图 3 2008 年 3 月 6 日古田  $M_L4.8$  地震序列  $M-t$  图 ( $M_L \geq 1.0$ )  
Fig. 3  $M-t$  diagram of Gutian  $M_L4.8$  earthquake serials ( $M_L \geq 1.0$ )

3 水口水库地震诱发机理分析

水口库区历史上无地震记录。自 1972 年到 1992 年未建库以前水口库区并无小震活动记录。1993 年水库建成并开始蓄水后，该区地震活动急剧增加（图 4，图 5），并已发生 4 级以上地震 4 次。笔者分析认为库区蓄水是导致水口库区地震的主因，库区建库后所发地震多为水库诱发地震。受 1999 年 9 月 21 日台湾集集 7.6 级地震影响，1999 年至 2000 年为水口库区地震多发时期，表明库区地震活动可能受区域应力场调整的影响，并与区域性构造地震活动相呼应。福建地震遥测台网测定结果表明：库区地震震中分布相对较为集中（图 6），主要分布在水电站上游的湾口—前洋一带；震源深度均较浅，大都在 10 km 以内，个别地震震源深度达 14 km，相对集中在 4 ~ 10 km 深度；小震活动具有成组群发特点，以小震群形式发生，且在强有感地震之前，震中分布集中，小震均有密集—平静现象。相对而言发生了 1 次较强有感地震后小震会平静一段时间。一般情况下密集活动期越长，或相对时间越长，未来发生较强有感地震的震级也愈大。震区地震序列变化与库区水位还存在密切相关现象，当水位急剧升降变化时对小震活动的诱发作用就很突出，水的荷载作用对库区某些不稳定构造部位有着重要的影响。

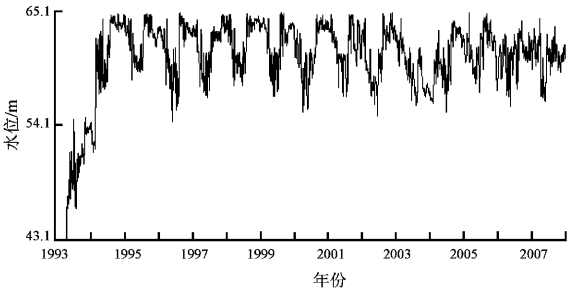


图 4 水口水库水位图  
Fig. 4 Hydrograph of Shuikou reservoir

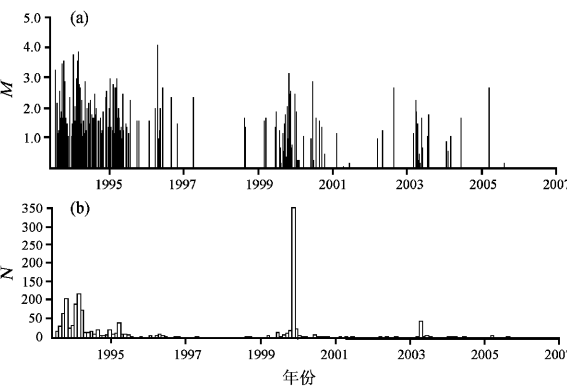


图 5 水口水库  $M-t$  图 (a) 与  $N-t$  图 (b)  
Fig. 5  $M-t$  diagram (a) and  $N-t$  diagram (b) of earthquakes in Shuikou reservoir

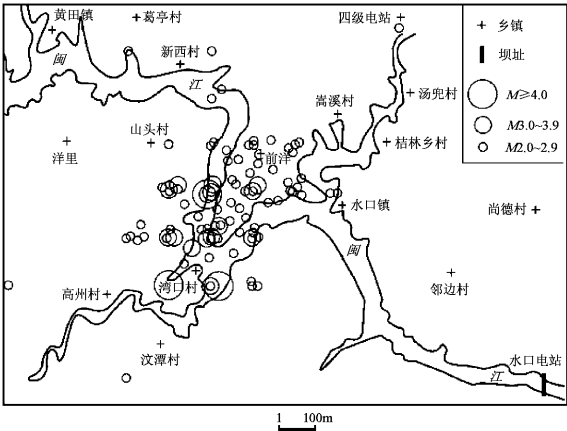


图 6 1993 年 5 月至 2008 年 10 月  
水口水库地震震中分布图  
Fig. 6 Distributed map of seismic epicenter of Shuikou reservoir from May, 1993 to October, 2008

水口水库地震多具有构造型水库地震的特点，构造型水库地震是断层受构造应力、库水压力、库水渗透至断层产生的渗水压力三者共同作用而产生的地震（胡毓良，1979；张林洪等，2002，2004）。

断层破裂型（构造型）地质构造环境是有利于形成水库地震的自然条件之一。水口库区的地质构造环境主要为火山岩和花岗岩，由于多组不同方位的断裂互相交切，构造破碎，有利于库水渗透。库区还存在 NW 向地热异常带。这些都说明水口库区存在诱发构造型水库地震的背景。

由于水的流动性，加上断层面及其周围比较破碎，破碎带渗水性能较好，而破碎带以外岩体较为完整，渗水性能较差，因而在水库蓄水后，可以近似认为断层对水流的阻力减小，随着水库蓄水，断层中的水与库水可形成水力联系，断层以外的岩体可以近似认为不导水。作用在断层面上的水压力随水位的升降而升降——水位升高，断层面上的水压力增大，水位下降，断层面上的水压力减小。因此，断层面上所受水压力  $P$  有如下关系式：

$$P = \gamma_w (h_1 + h_2) - L_s \quad (1)$$

式中， $\gamma_w$  为水的容重， $h_1$  为断层与库底交界处至库水面的垂直距离， $h_2$  为断层与库底交界处至计算断层点的垂直距离， $L_s$  为库水沿断层流动的水头损失。当  $h_1$  增大时， $P$  增大，即库水位升高时，断层面上所受水压力增大，断层发生断裂的可能性增就大，发生水库地震的可能性也增大。

大量的构造型水库诱发地震事件是因水的循环而使断裂富水性增强，使得已积累较强构造应力的断裂面发生错动，或因断层抗滑强度降低导致断裂错动而发震。水库诱发地震机理中水介质的“弱化”作用，即饱水岩石强度的降低和断层摩擦强度的降低是显著的。水文地质分析认为建库前地下水位以下的岩体已处于饱水状态，由水库蓄水引起的地下水位升高仅影响地下水位变动带的饱水状态，即岩体饱水对其强度的弱化仅限于地下水位变动带。而对于震源深度浅的诱发地震，除岩体饱水对地震的诱发作用外，一定压力梯度下充水时孔隙压力增大的变化也起了很重要的作用。所以在库水荷载作用、孔隙压力扩散和润滑作用下，构造破碎带或断裂交接部位渗透时，断层的软化和泥化降低了粘聚力和摩擦系数，使局部应力集中。根据孔隙水压效应机制，库水越深，渗透的水可达库下岩体的深度越深，孔隙裂隙水压力也越高，同时库下固体附加应力也越大。库区的岩体结构、介质不均匀性和各向异性，控

制着蓄水过程中地应力和孔隙压力的分布，导致局部应力和孔隙压力的高度集中，从而使水库诱发地震的可能性增大。

由以上分析可以得出，水口库区地质构造背景是水库诱发地震的内在条件，库水压力和水的渗透使断层活化或岩石块体失稳是构成诱发地震的外在条件。

## 4 水口水库诱发地震预测

全面认识水库诱发地震的地质构造条件，是水库地震预测的前提。但由于水库地震的形成原因复杂，目前存在不同的认识和解释，多数学者都认为，地质构造是发生水库诱发地震的基础条件。它包括水库所在地区的地质和地球物理环境，库底到地下数千米至十几千米深部的岩石组成和物质结构状态、库区构造断裂的分布、形状、力学性质、发育程度及其现今活动性，以及库区水文地质条件等。

由于科技水平的限制，目前对水库地震的预测工作仍处于初级阶段，对水库地震的特点及其预测——诱发水库地震的可能性、最大震级、发震地点及时间的分析，还处于资料和方法探索对比阶段，尚无成熟的预测潜在危险性的评价方法。仅能对水库特征参数（库容、库深、形状等）和构造、岩性、水文地质条件、应力状态、区域地震活动性进行综合研究，以及依据震例分析对可能诱发的地震作出判断。人们只能针对水库诱发地震的地质环境条件，着重对发震库区的力学性质、岩性特征、地震活动性以及构造应力场等进行分析，分析水库工程特征，构造特性和环境条件等，在对比分析库区地震类型及其地震序列的基础上，采用多种方法进行综合预报，比如用最大震级概率法求取水库诱发地震的条件概率；用扩散系数  $\alpha$  判别法推算水库介质系数统计平均震例的扩散系数值；用历史地震最大震级预测可能的诱发地震强度上限；在计算综合影响系数值与预测最大诱震震级时，考虑到了水库诱发地震与水的渗透密切相关，且诱发地震的因素同库深、库容和水库面积大小具有一定的关系；此外，还可根据卫星影像照片及野外勘察结果估算发震断裂长度，预测地震震级大小等等。相对来说，对水库诱发地震的最大震级的预测是最重要的，时

间和地点两个参数是次要的,因水库地震都是发生于水库蓄水以后不久,且分布在水库区,所以对时间与地点的判断在水库地震预测中并不具有突出的意义。如同地震的孕育和发生是一随机过程一样,水库地震的发生亦是有概率含义的判断和分析。

从图4可以看出,目前水口水库所发生的地震多集中在水库大坝上游的湾口附近,该区分布有湾口断层(图1中  $F_2$ ),断层走向为NE向  $45^\circ$ ,根据卫星影像及野外踏勘的结果,断层发育段长约11 km。水库诱发地震震级与发震断层长度的统计关系式为

$$M_s = 3.45 \log L + 1.76. \quad (2)$$

式中,  $L$  为断层长度,取  $L = 11$  km,代入式中求得水口水库地震最大震级  $M_s = 5.3$ 。

根据许振栋(2004)、许振栋和陈传倡(2004)的研究结果,水口水库最大地震震级有可能大于4.5级,但超过5.0级的可能性较小。目前为止水口库区发生的最大地震为2008年3月6日古田4.8级地震,检验结果与实际情况比较吻合。

## 5 结论

(1) 2008年3月6日古田水口库区  $M_L 4.8$  地震为构造型水库地震。地震序列活动存在两组发震构造,NW向的闽江断裂( $F_6$ )和NE向的湾口断裂( $F_2$ )是可能的发震构造。该地震序列活动衰减缓慢,持续近7个月,分析认为该序列后续地震活动将持续较长时间,活动水平仍会有起伏。

(2) 水口水库诱发地震分布比较集中,主要在古田县水口镇湾口—前洋一带,范围约  $13 \text{ km}^2$ 。震中分布优势方位约NE向  $45^\circ$ 。地震震源深度较浅,主要分布于11 km深度以内,大多在4~10 km之间,极少数深度达14 km,明显浅于周边发生的天然地震的震源深度。从地震记录来看,

地震频度呈起伏状态,但强度有上升趋势。

(3) 水口库区的首发地震与水库蓄水有直接关系。但是地震活动频度、强度与库水位的高低没有直接关系。水口库区地质构造背景是发生水库诱发地震的内在条件,库水压力和库水渗透至断层产生的渗水压力是构成诱发地震的外在条件。已有的地震序列特征表明水口库区水位的升降与发震之间的相关性越来越不明显。根据国内外水库地震震例,随着水口水库周围环境的改变,比如库区周边建设梯级电站等工程后,原先有所衰减的水库地震活动又会出现加剧的现象。今后库区地震活动将可能间接地受区域应力场的加强或减弱的影响,并与区域性构造地震活动相呼应。

本文部分资料由福建省地震局预报中心李祖宁高级工程师、鲍挺工程师、陈莹工程师和监测中心杨贵工程师等人提供,在此表示感谢。

## 参考文献:

- 胡毓良. 1979. 我国水库地震及有关成因问题的讨论[J]. 地震地质, 1(4): 43-57.
- 李志祥, 毛玉平, 谢建斌, 等. 云南景洪电站水库库区断层与地震危险性分析[J]. 地震研究, 28(2): 174-179.
- 林松建, 黄昭, 连玉平, 等. 2007a. 水口水库诱发地震特征与发震断裂的探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 27(1): 40-44.
- 林松建, 连玉平, 陈为伟. 2007b. 水口水库地区地震震源机制解特征分析[J]. 地震, 27(1): 114-119.
- 毛玉平, 王洋龙, 李朝才. 2004. 小湾库区水库诱发地震的地质环境分析[J]. 地震研究, 27(4): 339-343.
- 彭美凤, 林世敏, 林松建. 1997. 水口水库地震及其活动特征[J]. 华南地震, 17(2): 83-89.
- 许振栋. 2004. 福建水口水库诱发地震最大震级预测[J]. 地震地磁观测与研究, 25(3): 58-62.
- 许振栋, 陈传昌. 2004. 水口水库诱发地震研究[J]. 大地测量与地球动力学, 24(2): 58-63.
- 张林洪, 刘荣佩, 周建芬, 等. 2002. 构造型水库地震的断裂力学分析[J]. 地震研究, 25(2): 186-191.
- 张林洪, 刘荣佩, 周建芬, 等. 2004. 库水压力作用下不同类型断层诱发水库地震的可能性分析[J]. 地震研究, 27(3): 241-245.

## Discussion on Shuikou Reservoir $M_L$ 4.8 Earthquake in Gutian, Fujian Province and Reservoir-induced Earthquake

WU Shao-zu, CHEN Guang, DING Xue-ren, YUAN Li-wen

(*Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

### Abstract

We expatiate the geological structure of Shuikou reservoir and its vicinage and the seismicity fore-and-aft sluice. We analyze Gutian  $M_L$  4.8 earthquake, the maximum earthquake occurred in Shuikou reservoir area, then analyze the geological structure and the hydrological environment of Shuikou reservoir and the mechanism of reservoir-induced earthquake. The result shows that the earthquakes occurred in Shuikou reservoir are correlated with sluiced, and most epicenters concentrated in Wankou-Qianyang zone, Shuikou Town, Gutian County. The area is about 13 square kilometers. The activity of earthquake of Shuikou reservoir will keep long time, and the correlation between the rise and fall of water line of Shuikou reservoir and the occurrence of earthquake. Finally we discuss the method of forecasting the reservoir-induced earthquake and the maximal class earthquake of Shuikou reservoir.

**Key words:** reservoir-induced earthquake; Shuikou reservoir; seismicity; prediction of earthquake