

胡先明, 杜瑶. 用响应比波速比监测预测瀑布沟水库诱发地震[J]. 华南地震, 2014, 34(2): 11-18. [HU Xianming, DU Yao. The Application of Load-unload Response Ratio and Wave Velocity Ratio in Monitoring and Forecasting Earthquakes Induced by the Pubugou Reservoir [J]. South china journal of seismology, 2014, 34(2): 11-18.]

## 用响应比波速比监测预测瀑布沟水库诱发地震

胡先明, 杜瑶

(四川省地震局, 成都 610041)

**摘要:** 介绍对瀑布沟水库用加卸载响应比和波速比监测预测水库诱发地震的实践过程, 通过课题以往的预测和对应其后期实际发生的地震来分析, 结果显示: 地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  和  $C_r$  值、库水下方地震波速比这两种方法都可以作为监测预测水库诱发地震的新方法。

**关键词:** 水库诱发地震; 波速比; 瀑布沟水库; 加卸载响应比

中图分类号: P315.728 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 02-0011-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.02.002

## The Application of Load-unload Response Ratio and Wave Velocity Ratio in Monitoring and Forecasting Earthquakes Induced by the Pubugou Reservoir

HU Xianming, DU Yao

(Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The paper described the application of load-unload response ratio and wave velocity ratio in monitoring and forecasting earthquakes induced by the Pubugou reservoir. From the previous forecasts and the corresponding earthquakes that actually occurred, the paper did analysis. The results show that frequency of earthquakes and load-unload response ratios ( $Y_n$  and  $C_r$ ) and wave velocity ratios under a reservoir can both be used as new methods to monitor and forecast induced reservoir earthquakes.

**Keywords:** Induced reservoir earthquake; Wave velocity ratio; Pubugou Reservoir Load-unload response ratio

收稿日期: 2013-06-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目“汶川地震断裂带科学钻探”专题“断裂带深部流体观测及其与余震活动关系研究”(WFS-D-10-03)资助; 中国地震局地震科技星火计划项目-瀑布沟水库库区震源物理与诱发地震研究(XH-1022)资助。

作者简介: 胡先明 (1956-), 男, 高级工程师, 主要从事水库诱发地震研究和地下水动态管理。

E-mail: huxianmingg@126.com.

## 0 引言

针对水库蓄水后,库水对地下介质影响过程,目前人们没有很好的监测方法。前几年笔者在做“十一五”国家科研计划支撑项目“火山与水库地震监测预报关键技术研究”中,将地震学研究中较为成熟的加卸载响应比和波速比方法应用于水库地震研究和监测预测中<sup>[1-2]</sup>。其后在做中国地震局地震科技星火计划项目“瀑布沟水库库区震源物理与诱发地震研究”中,应用所介绍的地震频次加卸载响应比和水体下方地震波速比方法,探索瀑布沟水库库区水库诱发地震的监测预测,取得较好成果。

用新探索的水库诱发地震的监测预测方法响应比和波速比来监测预测瀑布沟水库的诱发地震是本文的进一步探索。根据以往研究:在大桥水库诱发的  $M_s$  4.6 地震前后,库水加卸载作用导致的地震频次及能量的加卸载响应比在震前存在明显高值异常,震后异常消失;由彝海子地震台记录的穿过大桥水库蓄水区域底下的地震波所计算的波速比,在 4.6 级主震前存在高值异常,反映出库水对波速比的影响;以八角地震台记录的穿过紫坪铺水库蓄水区域底下的地震波所计算的波速比,在 2006 年 8 月 28 日库区东北部出现微小的波速比高值异常,结果于 2006 年 10 月至 2007 年 2 月在八角台附近的汶川水磨发生了 2.5 级水库诱发地震震群。

## 1 瀑布沟水库基本情况

瀑布沟水电站工程位于大渡河干流上,大渡河中游与尼日河汇口上游觉托附近,下距乌斯河

镇、成昆铁路汉源车站公路里程 9 km,上距汉源、石棉县城公路里程 28 km、80 km。电站水库工程属大(I)型一等工程,是典型的高山峡谷型高坝大水库。水库具有季调节能力、发电、防洪、拦沙和改善下游航运条件的功能,系大渡河中游河段的控制性水库。水库由干流大渡河和支流流沙河组成,干流回水至石棉县城,库长 72 km,水库 2009 年 11 月 1 日蓄水<sup>[3]</sup>。

2006 年 1 月 1 日至 2012 年 8 月 31 日,瀑布沟水库的坝前水位(图 1),2011 年 12 月 31 日为最高值。从实际蓄水位情况看,2006 年 1 月 1 日至 2009 年 9 月的坝前水位变化是河流来水的变化,水位从低值上升到最高水位并持续作为加载时段,水位从高值降低到低值水位并持续作为卸载时段,同时作为水库不蓄水时的响应比参考值。2009 年 11 月 1 日下闸后至曲线末尾 2013 年 4 月 30 日,坝前水位有明显周期性变化,从蓄水到高水位并持续作为加载时段,水位从高值降低到低值水位并持续作为卸载时段,以此计算蓄水后的库水加卸载响应比。蓄水后的库水加卸载响应比是否正常的判别主要参考大桥水库研究实例<sup>[4]</sup>,同时也参考了在研究工作中已经有明确结论的二滩水库和紫坪铺水库研究实例。瀑布沟水库数字遥测地震台网 2006 年 10 月 14 日至 2013 年 5 月 31 日记录研究区  $\leq 4.1$  级地震 2 361 次(图 1),其中  $\leq 0.9$  级 1 262 次,1~1.9 级 991 次,2~2.9 级 93 次,3~3.9 级 11 次,4~4.1 级 2 次。

## 2 加卸载响应比原理

地震孕育过程是一个非线性、不可逆的过程,震源区介质的加载响应不同于卸载响应,这种加

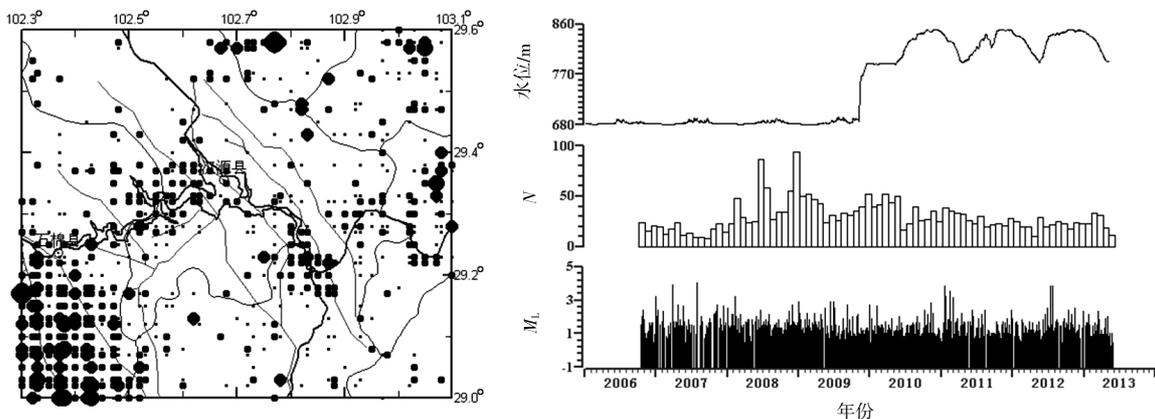


图 1 瀑布沟水库研究区震中分布、坝前水位、 $N-T$  和  $M-T$  图

Fig.1 The epicenter distribution of Pubugou reservoir research area, water level in front of dam, the  $N-T$  and  $M-T$  diagram

载响应与卸载响应的差别可以定量地刻画地震的孕育过程。基于这个物理概念,提出了一个新的参数-加卸载响应比,作为一类地震前兆,用来定量预测强震的发生<sup>[4]</sup>。地震预测的加卸载响应比方法(LURR)是目前比较流行的地震预测方法之一。该方法具有物理基础并且在地震预测实践中取得了令人鼓舞的预测效果<sup>[5-13]</sup>。水库的蓄水和放水过程形成了对于水库库盆及岩体的加卸载,那么库区地震活动对此有何响应呢?

## 2.1 库水加卸载响应比的研究思路

固体潮作用在新丰江、丹江口、参窝和佛子岭等水库地震主震前加卸载响应比随时间的变化结果表明,水库地震前加卸载响应比 $Y$ 明显升高<sup>[7]</sup>。

加卸载响应比 $Y$ 是一个能够定量地反映非线性系统趋近失稳程度的参数,可以将其定义如下

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (1)$$

式(1)中的 $X_+$ 和 $X_-$ 分别表示加载和卸载的响应率。

从典型的岩石应力-应变本构曲线可以明显地看出,在弹性阶段, $X_+=X_-$ ,所以 $Y=1$ ;出现损伤之后, $X_+>X_-$ ,所以 $Y>1$ ;由此可知,随着载荷的增大,材料损伤程度加剧, $Y$ 的值将会变得更大。因此,加卸载响应比可以用来作为材料即将达到破坏的判据,同样也可以用来作为预测地震发生所需的前兆。

临界点理论(CPH)认为,地震是一种临界现象。按照该理论,地壳并不一直处于临界状态,而是不断地趋近和远离临界点<sup>[14]</sup>。按照该理论,地壳并不一直处于临界状态,当一次大地震发生之后,该地区的地壳将离开临界状态,然后,随着构造应力的逐步增加,该地区的地壳又逐步趋向临界点。这个过程的重要特征之一,就是随着向临界点的趋近,地壳的临界敏感性随之增大。这一特征被不同研究集体用作进行地震中期预报的依据,而加卸载响应比 $Y$ 正是能够度量这种临界敏感性的重要参数。

利用事件数、Benioff应变和能量作为响应,可以得到加卸载响应比随时间的变化情况。它们反映的规律基本相同:当载荷水平较低、材料的损伤程度较小时,加卸载响应比值较小,也比较稳定;当载荷水平较高,接近破坏的临界载荷时,材料的损伤程度较大,加卸载响应比就会急剧增加;而当达到或超过临界载荷,并且又在材料发

生根本性破坏之前,加卸载响应比则出现了比较明显的回落。可以将日、月潮汐力在岩石圈中所引起的应变及其相关量作为加载和卸载阶段的响应率;在地震学中,加卸载响应比常用地震的能量作响应<sup>[8]</sup>。

使用LURR方法进行研究的前提是必须确定加卸载的力源和时段,以前的研究一般是基于固体潮的加卸载作用<sup>[7]</sup>。大桥水库(大II型)在四川省冕宁县大桥镇境内,大坝位于高地震烈度区的安宁河上游,1999年5月20日开始蓄水,收集到的此前6年多的坝前水位变化约在40m,经计算得知库水对库盆的静压变化大约是 $4 \times 10^5$  Pa,比固体潮的作用大2个量级,由此可见水库的蓄水和放水过程是对库区影响最大的加卸载的力源。因此本研究将库水压力作为力源,相应的水库的蓄水和放水时段作为加卸载的时段;根据库水加卸载时段,统计库区地震次数或能量,计算出相应的加卸载响应比。从库水的加卸载与 $M_s$  4.6水库地震的关系中,寻找用于水库诱发地震预测的实用方法<sup>[2]</sup>。

## 2.2 地震频次加卸载响应比 $Y_n$ 和 $C_r$ 值计算公式

据加卸载响应比 $Y$ 定义,考虑时间长度不等,实际应用计算地震频次的加卸载响应比 $Y_n$ 公式为:

$$Y_n = \frac{N_+/T_+}{N_-/T_-} \quad (2)$$

式(2)中, $N_+$ 为加载时段地震次数, $N_-$ 为卸载时段地震次数, $T_+$ 为加载时段天数, $T_-$ 为卸载时段天数。分子是加载时段地震发生率,分母是卸载时段地震发生率,通过化解了库水的加卸载时段长度不同的障碍。从分式中可见,地震频次的加卸载响应比 $Y_n$ 的物理意义是:在考虑为受库水影响的固定区域,库水的加载时段与卸载时段地震发生率的比。

据统计量 $C_r$ 值定义,为方便将原公式表述为:

$$C_r = 1 + \frac{Y_n - 1}{Y_n + 1} \quad (3)$$

式(3)中, $Y_n$ 为地震频次的加卸载响应比。发生在加载期间的地震多,表明震源体对库水的作用敏感;若 $C_r$ 值远大于1,则说明震源体对库水的响应明显,震源体极不稳定。最大值的 $C_r \approx 2.0$ 。 $C_r < 1$ ,表明震源体对库水的作用不敏感,或响应不甚明显,震源体为相对稳定的状态。最小值的 $C_r \approx 0$ 。因此, $0 \leq C_r \leq 2$ 。

### 3 瀑布沟水库加卸载响应比的监测

瀑布沟水库 2009 年 11 月 1 日蓄水, 蓄水后 3 年多来坝前水位变化幅度为 60 m, 经计算得知库水对库盆的静压变化为  $6 \times 10^5$  Pa, 比固体潮的作用大 2 个量级, 由此可见水库的蓄水和放水过程是对库区影响最大的加卸载的力源。

#### 3.1 研究区地震频次加卸载响应比 $Y_n$ 值和地震频次 $C_r$ 值

14 个地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  在 0.40~1.93 之间变化,  $\bar{Y}_n=0.96$ 。蓄水前 (2006-10-01~2009-10-31) 记录  $M_L \leq 4.1$  级地震 1 147 次, 最大震级为 4.1 级。地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  在 0.40~1.93 之间变化,  $\bar{Y}_n=0.86$ , 这个时期不存在库水加卸载作用, 因此可以将此作为参考的本底

值。蓄水后 (2009-11-01~2013-04-14) 记录  $M_L \leq 3.9$  级地震 1 197 次, 最大震级为 3.9 级。地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  在 0.83~1.51 之间变化,  $\bar{Y}_n=1.03$ 。2012 年 5 月 11 日至 12 月 20 日库水加载时段与 2012 年 12 月 21 日至 2013 年 4 月 14 日库水卸载时段做出的地震频度库水加卸载响应比  $Y_n=0.71$ , 在正常变动范围(图 2)。

14 个  $C_r$  值在 0.58~1.32 之间变化,  $\bar{C}_r=0.94$ 。蓄水前 (2006-10-01~2009-10-31)  $C_r$  值在 0.58~1.32 之间变化,  $\bar{C}_r=0.86$ , 这个时期不存在库水加卸载作用, 可以将此作为参考的本底值。蓄水后 (2009-11-01~2013-04-14)  $C_r$  值在 0.83~1.20 之间变化,  $\bar{C}_r=1.00$ 。最后的数 2012 年 5 月 11 日至 12 月 20 日库水加载时段与 2012 年 12 月 21 日至 2013 年 4 月 14 日库水卸载时段做出的地震频度库水加卸载响应比  $C_r=0.83$ , 在正常变动范围(图 2)。

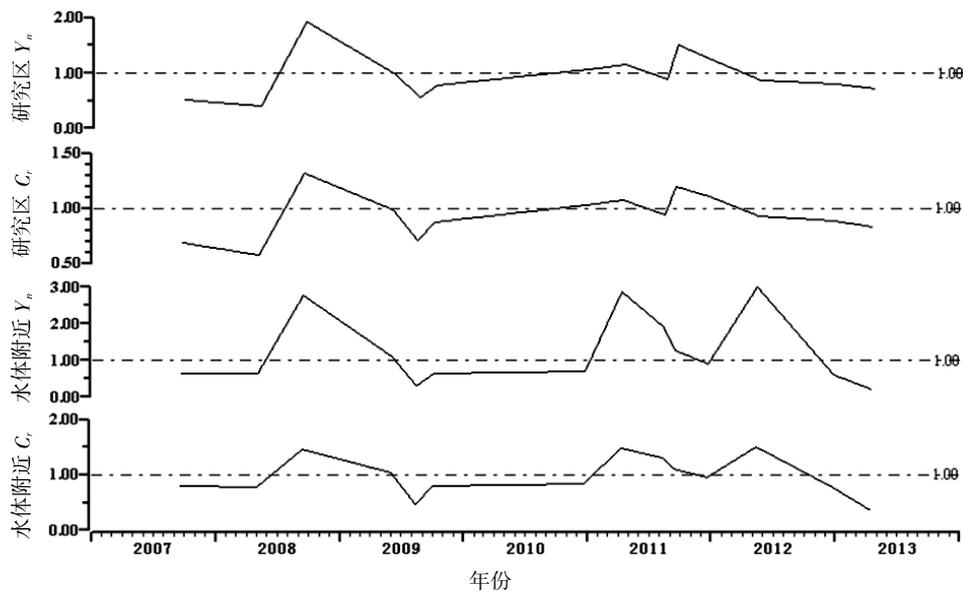


图 2 研究区与水体附近  $Y_n$  和  $C_r$  值

Fig.2 The  $Y_n$  and  $C_r$  value of research area and water body area

#### 3.2 水体附近地震频次加卸载响应比 $Y_n$ 值和地震频次 $C_r$ 值

水库水体对于库底岩石的作用, 陈祖安<sup>[15]</sup>有双 10 km 的相关论述, 这也是做水库地震研究要考虑的事, 故此选取东经  $102.35^\circ \sim 102.95^\circ$  与北纬  $29.15^\circ \sim 29.5^\circ$  为瀑布沟水库水体附近来研究, 这样做更加能够突出水库水体对于库底岩石的作用。2006 年 10 月 14 日至 2013 年 4 月 14 日记录瀑布沟水库水体附近  $\leq 2.6$  级地震 853 次, 其中  $\leq 0.9$  级 488 次, 1~1.9 级 353 次, 2~2.6 级 12 次。

14 个地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  在 0.21~

3.01 之间变化,  $\bar{Y}_n=1.26$ 。蓄水前 (2006-10-01~2009-10-31) 有  $\leq 2.6$  级地震 604 次, 最大震级为 2.6 级。地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  在 0.31~2.77 之间变化,  $\bar{Y}_n=1.02$ , 这个时期不存在库水加卸载作用, 因此可以将此作为参考的本底值。蓄水后 (2009-11-01~2013-04-14) 有  $\leq 2.5$  级地震 249 次, 最大震级为 2.5 级。地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  在 0.21~3.01 之间变化,  $\bar{Y}_n=1.44$ 。2012 年 5 月 11 日至 12 月 20 日库水加载时段与 2012 年 12 月 21 日至 2013 年 4 月 14 日库水卸载时段做出的地震频度库水加卸载响应比  $Y_n=0.21$ , 在正

常变动范围(图2)。

14个 $C_r$ 值在0.35~1.50之间变化,  $\bar{C}_r=0.98$ 。蓄水前(2006-10-01~2009-10-31) $C_r$ 值在0.47~1.47之间变化,  $\bar{C}_r=0.89$ , 这个时期不存在库水加卸载作用, 数据表明 $C_r$ 值随时间在1左右变化, 可以将此作为参考的本底值。蓄水后(2009-11-01~2013-04-14) $C_r$ 值在0.35~1.50之间变化,  $\bar{C}_r=1.04$ 。2012年5月11日至12月20日库水加载时段与2012年12月21日至2013年4月14日库水卸载时段做出的地震频度库水加卸载响应比 $C_r=0.35$ , 在正常变动范围(图2)。

对瀑布沟水库的研究区和水体附近研究地震频度库水加卸载响应比 $Y_n$ 和 $C_r$ , 在正常变动范围。

#### 4 库水下方地震波速比原理

当地震波通过未来强震的震源区时, 其传播速度可能发生变化, 其变化量约为百分之几至百分之十几。波速比可由下式计算:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\mu}} \quad (4)$$

式(4)中 $\lambda$ 为应力,  $\mu$ 为弹性模量。不难看出, 当震源区的应力状态发生变化时, 弹性模量发生变化, 因而引起波速的变化<sup>[6]</sup>。

选用1个单台进行研究, 其记录的Pg和Sg穿越库水淹没区, 记录可能携带有由于库水荷载和渗透作用造成的库区底部岩石变化信息。同时选用1个单台对比研究, 认为该台的地震波记录的Pg和Sg没有穿越库水淹没区, 对同一次地震将2个单台的计算结果对比研究。

蓄水前是包气带, 蓄水后变成成为饱水带, 水文地质条件发生了本质的变化。这个地带在垂直方向上距离地表数十至数百米, 应属于地表极浅层的范围; 在水平方向上不超过河谷的第一分水岭, 一般小于3~5 km。断裂带与库水直接接触, 或通过次级旁侧断层等与库水保持一定的水力联系(可按主断裂带至库边距离不大于10 km考虑)。由于蓄水导致地壳上层(数百米至数千米, 极少数情况可达到10 km)的区域应力场发生变化<sup>[5]</sup>。

选择的研究区应当满足: 作为研究对象的单台, 其记录的Pg和Sg穿越库水淹没区; 作为对比研究的单台记录的Pg和Sg不穿越库水淹没区。计算某水库水体下方波速比, 以研究波速比在水库地震前后的变化情况。

设台站处在异常区内, 由震源到台站的距离

为 $R$ , 则纵、横波速比 $\nu=v_p/v_s$ , 可用下式求得:

$$\nu = \frac{v_p}{v_s} = \frac{v_p/R}{v_s/R} = \frac{T_s}{T_p} \quad (5)$$

$T_s$ 、 $T_p$ 分别为S波和P波走时, 可表示为:  $T_s=t_s-T_0$ ,  $T_p=t_p-T_0$ , 将其代入式(5)简化得

$$\nu = 1 + \frac{t_s-t_p}{t_p-T_0} \quad (6)$$

式中 $t_s$ 为S波到时,  $t_p$ 为P波到时,  $T_0$ 为发震时刻。利用上式求波速比 $\nu$ 值, 可从图纸上直接量取 $t_s$ 、 $t_p$ , 关键在求 $T_0$ 。 $T_0$ 一般为多台和达直线定出的平均发震时刻, 对定位精度较高的地震, 也可以目录中的发震时刻为准<sup>[7]</sup>。

在实际工作中, 还要注意首先选用定位精度较高的地震来进行波速比计算, 以确保计算结果的可靠性; 其次在认定波速比是否正常的判别时, 不以单个波速比为依据, 是以多个(5个以上)波速比的平均值是否偏离平均值或正常值为标准。库水下方波速比的是否正常的判别主要参考大桥水库地震研究实例和紫坪铺水库监测实例<sup>[1]</sup>, 同时参考相应文献<sup>[18-22]</sup>。

#### 5 瀑布沟水库库水下方地震波速比的监测

从瀑布沟地震台网2007年1月至2013年3月31日《瀑布沟数字遥测地震台网地震月报目录及观测报告》中, 选取在29.0°~29.2°N, 102.3°~102.5°E范围内211次 $M_L \geq 1.5$ 地震数据作为研究资料, 其中1.5~1.9级147次, 2.0~2.9级55次, 3.0~3.9级8次, 4.0级1次。选择瀑布沟台网分布在水库东北岸的罗挖坪、宰牛坪、鲁布沟和白岩岗4个子台作为研究对象, 震中距离罗挖坪台25~54 km, 距白岩岗台25~55 km, 距宰牛坪台31~60 km, 距鲁布沟台38~64 km, 其记录的地震波都通过库水淹没区(图3)。选择徐谷坪台做对比, 该台距离震中约8~35 km, 记录到的地震Pg、Sg波未穿越库水淹没区。波速比以同一地震多台记录资料分别计算。通过提取穿过水库蓄水区域底下的地震波射线所反映出的波速比在蓄水前后的变化, 以及蓄水后随时间推移波速比的变化, 从中找寻水库诱发地震的发震可能信息。

图4中, 对比台徐谷坪台记录到159个地震, 波速比值在1.527~1.755之间,  $\bar{\nu}=1.63$ 。四个研究台: 罗挖坪台记录到132个地震, 波速比值在1.564~1.752之间,  $\bar{\nu}=1.66$ ; 宰牛坪台记录到175

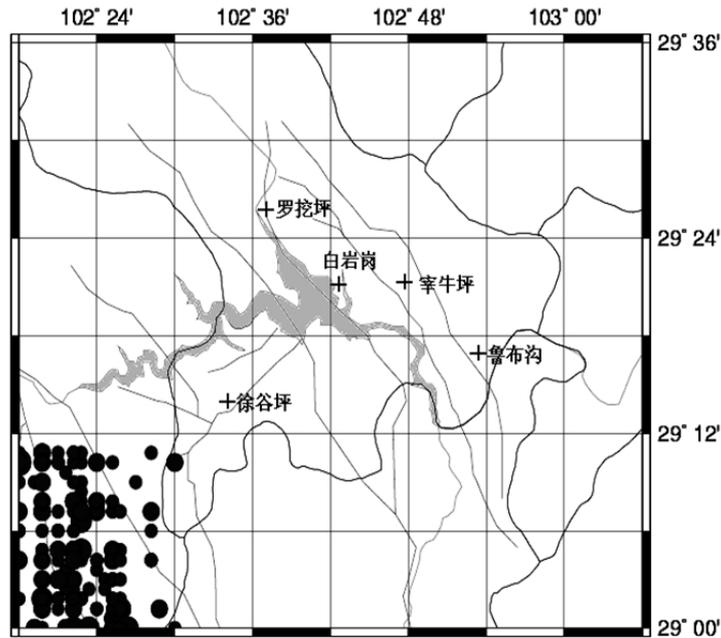


图3 所用地震震中与观测台分布

Fig.3 Distribution of earthquake epicenters and observation stations

个地震，波速比值在 1.584~1.754 之间， $\bar{\nu}=1.68$ ；鲁布沟台记录到 95 个地震，波速比值在 1.582~1.728 之间， $\bar{\nu}=1.65$ ；白岩岗台记录到 133 个地震，波速比值在 1.558~1.754 之间， $\bar{\nu}=1.66$ 。

蓄水前(2007-01~2009-10-31)对比台徐谷坪台记录到地震 53 个(图 4)， $\bar{\nu}=1.63$ ，比理论值小 0.1，研究台罗挖坪子台记录到的 56 个地震， $\bar{\nu}=1.65$ ，比理论值小 0.08，比徐谷坪台高 0.02；宰牛坪台记录到的 75 个地震， $\bar{\nu}=1.67$ ，比理论值小 0.06，比徐谷坪台高 0.04；鲁布沟台记录到的 46 个地震， $\bar{\nu}=1.65$ ，比理论值小 0.08，比徐谷坪台高 0.02；白岩岗台记录到的 42 个地震， $\bar{\nu}=1.66$ ，比理论值小 0.07，比徐谷坪台高 0.03。蓄水后(2009-11-01~2012-08-31)对比台徐谷坪台记录到的 106 个地震， $\bar{\nu}=1.63$ ，比理论值小 0.1；罗挖坪台记录到的 76 个地震， $\bar{\nu}=1.66$ ，比理论值小 0.07，比徐谷坪台高 0.03；宰牛坪台记录到的 100 个地震， $\bar{\nu}=1.68$ ，比理论值小 0.05，比徐谷坪台高 0.05；鲁布沟台记录到的 49 个地震， $\bar{\nu}=1.65$ ，比理论值小 0.08，比徐谷坪台高 0.02；白岩岗台记录到的 91 个地震， $\bar{\nu}=1.66$ ，比理论值小 0.07，比徐谷坪台高 0.03。蓄水前后的波速比有个别值偏低或偏高，但均在正常变动范围，且没有呈现出趋势性的偏低或偏高。

综上所述，瀑布沟水库所选取研究的台站波

速比和对比台相比均在正常变动范围内，蓄水前后波速比也无明显变化，不预示有较大地震发生。

## 6 方法在瀑布沟水库的监测预测过程及效果

### 6.1 监测预测过程

对于瀑布沟水库，从开展中国地震局地震科技星火计划项目-瀑布沟水库库区震源物理与诱发地震研究以来，2011 年中起每当年中和年度会商时开展地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  和  $C_r$  研究，2012 年中起每当年中和年度会商时开展库水下方地震波速比研究。在最近的两年多时间里，通过总体综合的水库地震监测预测，结合研究的瀑布沟水库及附近地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  和  $C_r$  在正常变动范围结论，结合研究的库水下方地震波速比在正常变动范围内，提出对于该水库诱发地震监测预测的趋势意见。

### 6.2 监测预测效果

从开展瀑布沟水库诱发地震监测预测以来，特别是开展中国地震局地震科技星火计划项目-瀑布沟水库库区震源物理与诱发地震研究以来，期间在 2013 年 4 月 20 日，四川省雅安芦山发生 7.0 级地震，距瀑布沟水库大坝 120 km，距相关研究区的边界不足 80 km，笔者的研究结论所提出的预

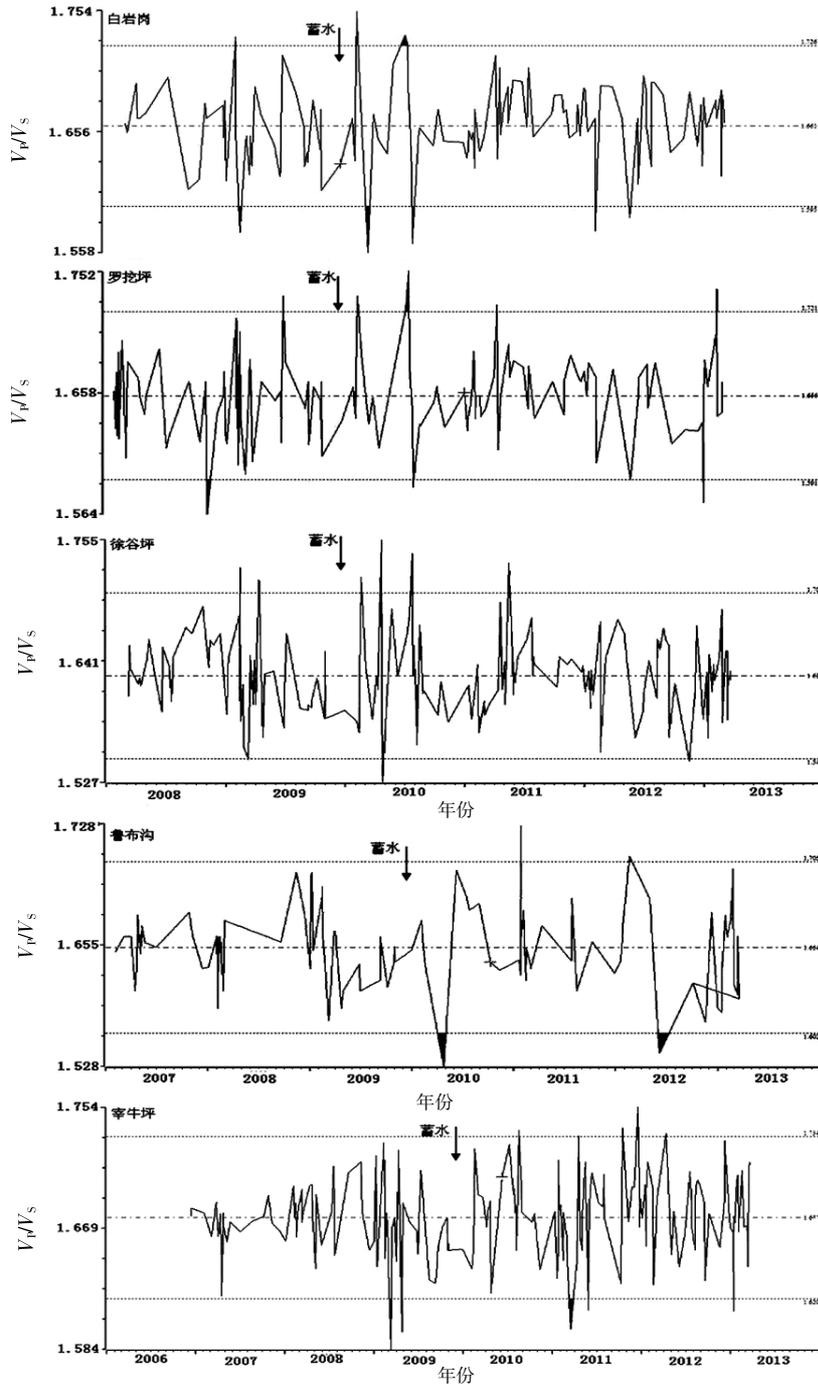


图 4 水下波速比值

Fig.4 Underwater velocity ratio

测的趋势意见符合后期的地震发生实况。

### 7 讨论与结论

目前地震预报处于探索性研究阶段，没有专门针对水库诱发地震的专用判别指标，本研究力图通过用地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  和  $C_r$  值，用库水下方地震波速比的研究，来监测预测瀑布沟水库诱发地震，通过实践性研究，在实践中探

索出有用的技术指标。常用做响应比的有效影响因素选用固体潮的居多，对于水库而言水库的蓄放水过程是对库区影响最大的加卸载力源，经过计算大桥水库静压变化大约是  $4 \times 10^5$  Pa，瀑布沟水库静压变化为  $6 \times 10^5$  Pa，都比固体潮的作用大 2 个量级，远远大于固体潮的作用。因此，做库水加卸载响应比是针对水库的有效研究。波速比是研究地下岩石性状的有效手段，水库蓄水以后，水库底部地下岩石性状的变化情况用库水下方地震

波速比的研究, 同样地能回答是否有变化和有多大的变化。

通过用地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  和  $C_r$  值, 用库水下方地震波速比的研究, 来监测预测瀑布沟水库的水库诱发地震实践, 从本课题以往的预测和对应其后期实际发生的地震来看, 认为: 地震频度库水加卸载响应比  $Y_n$  和  $C_r$  值、库水下方地震波速比两种方法, 都可以作为监测预测水库诱发地震的新方法来探索。

致谢: 对朱航研究员给予本研究的大力支持致以衷心感谢!

### 参考文献:

- [1] 胡先明, 谢蓉华, 韩进, 等. 水库诱发地震中水库水体下方的地震波速比[J]. 地震研究, 2008, 31 (3): 215-221.
- [2] 胡先明, 朱航. 大桥水库 4.6 级地震前后的库水加卸载响应比变化特征[J]. 地震地质, 2009, 31 (4): 715-723.
- [3] 胡先明. 瀑布沟水电站水库天然地震本底特征[J]. 四川地震, 2012 (1): 30-36.
- [4] 尹祥础, 张浪平, 张晖辉, 等. 加卸载响应比 20 年及其展望[J]. 国际地震动态, 2008 (4): 1-17.
- [5] 尹祥础. 地震预报新途径探索[J]. 中国地震, 1987, 3 (1): 1-7.
- [6] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆-响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑), 1991, 21 (5): 512-518.
- [7] 陈学忠, 尹祥础. 水库地震主震前加卸载响应比的变化特征[J]. 中国地震, 1995, 11 (4): 361-367.
- [8] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙莽, 等. 加卸载响应比 (LURR) 理论的实验研究[J]. 中国地震, 2003, 19 (1): 58-66.
- [9] 余怀忠, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比 (LURR) 响应量的研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26 (4): 298-302.
- [10] 万永革. 关于加卸载响应比理论运用于地震预测的几点思考[J]. 西北地震学报, 2004, 26 (2): 178-182.
- [11] 张昭栋, 王秀芹, 董守德. 加卸载响应比在体应变固体潮中的应用[J]. 地震, 1999, 19 (3): 217-222.
- [12] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (9): 1874-1881.
- [13] YIN X C, ZHUANG L P, ZHUANG H H, et al. 2006. LURR's twenty yYears and its perspective[J]. Pure and Applied Geophysics, 163 (11-12): 2317-2341.
- [14] YIN Xiangchu, YU Huaizhong, V.Kukshenko, et al. 加卸载响应比 (LURR)、矩/能量加速释放 (AM/ER)、态矢量; 岩石试件破坏前兆的实验研究[J]. 世界地震译丛, 2005 (2): 36-43.
- [15] 陈祖安. 中国水力发电工程 A 工程地质卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 67-71.
- [16] 傅淑芳, 刘宝诚, 李文艺, 等. 地震学教程(下册)[M]. 北京: 地震出版社, 1980: 264-270.
- [17] 王海涛, 敖雪明, 杨马陵, 等. 单台地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 37-38.
- [18] 冯德益. 地震波速异常[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- [19] 耿乃光, 郝晋升, 李纪汉, 等. 岩石的波速比与静水压的关系[J]. 地震学报, 1992, 14 (4): 501-506.
- [20] 王静瑶. 丹江口水库蓄水后的波速比异常[C]/中国诱发地震. 北京: 地震出版社, 1984: 78-84.
- [21] 赵晋明, 胡毅力, 杨润海, 等. 岩石临破坏前波速奇异变化的再研究[J]. 地震研究, 2001, 24 (2): 136-139.
- [22] 邹振轩, 李金龙, 俞铁宏. 应用多台和达法测定温州珊溪水库地区地震的平均波速比[J]. 地震, 2006, 26 (4): 133-137.