

杜瑶, 邵玉平, 阮祥, 等. 雅砻江锦屏一级水电站库区蓄水后波速比变化研究 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 34-43. [DU Yao, SHAO Yuping, RUAN Xiang, et al. Study on the Variation of Wave Velocity Ratio of Yalong River Jinping Level I Hydropower Station after Retaining Water at the Reservoir Area [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 34-43]

雅砻江锦屏一级水电站库区蓄水后 波速比变化研究

杜瑶, 邵玉平, 阮祥, 王余伟, 戴仕贵
(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 选取了雅砻江锦屏一级水电站水库蓄水后, 四川省木里县项脚乡一带 (27.6°~28.2°N、101.1°~101.7°E) 研究范围内, 2012年3月至2016年9月30日 $M_L \geq 2.0$ 级的1939次地震进行单台波速比计算, 结果显示: 库区下闸蓄水后四个阶段, 5个台站均呈现出了各阶段波速比均值上升的现象, 表明在库区的加卸载以及库水的长期渗透作用下, 库区及附近的介质逐渐发生了改变。

关键词: 锦屏一级水电站; 波速比; 地下介质变化。

中图分类号: TU352.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-0034-010

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.05

Study on the Variation of Wave Velocity Ratio of Yalong River Jinping Level I Hydropower Station after Retaining Water at the Reservoir Area

DU Yao, SHAO Yuping, RUAN Xiang, WANG Yuwei, DAI Shigui
(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: Selecting Xiangjiao Town (27.6°~28.2°N, 101.1°~101.7°E) of Muli County, Sichuan Province at the reservoir area of Yalong River Jinping Level I Hydropower Station after retaining water as research scope, this paper calculated single station wave velocity ratio of 1939 earthquakes with $M_L \geq 2.0$ from Mar 2012 to Sep 30th, 2016. The results show that the five stations experienced the rise of mean wave velocity ratio at various stages during the four stages after retaining water at reservoir area, indicating that the medium at reservoir area and its vicinity experienced variations under the loading and unloading of reservoir area and the long-term permeation of reservoir water.

Keywords: Jinping Level I Hydropower Station; Wave Velocity Ratio; Variation of Underground Medium

收稿日期: 2019-12-07

基金项目: 中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (IGCEA1705); 中国地震局监测、预报、科研三结合课题 (3JH-202001077)

作者简介: 杜瑶 (1984-), 女, 工程师, 主要从事水库地震监测及分析。

E-mail: 64953467@qq.com

0 引言

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内，是雅砻江干流下游河段的控制性水库梯级电站，锦屏一级水库地震监测系统于2011年11月1日进入考核运行，加强和完善了该水库的地震监测能力。2012年11月30日雅砻江锦屏一级水电站水库开始正式蓄水，蓄水后历史上鲜有地震的木里项脚乡一带频繁发生小地震，发生在木里县项脚乡一带的震群就占库区及附近地震90%左右。

众所周知，构造型水库地震发生的两个要素是断裂受到的应力已接近临界破裂状态和库水沿裂隙侵入断层降低了断层的破裂强度。因而我们可以在已知介质种类的前提下通过波速比来推测地震波射线穿过区域介质所处的应力状态，也可以在不同时间点上用先后发生的地震的波速比变化来推测介质所受到的应力的变化或介质裂隙中水体充盈的变化。

有研究表明，引起波速比变化的主要因素是岩体裂隙和空隙变化以及岩体渗水后的软化，而对波速比影响较大的是裂隙中流体饱和度，由珊溪水库地震波速比变化经历下降—回升—正常过程，可以看到水库诱发地震显示出明显的扩容—饱和—发震的过程，这与水库地震震源浅，裂隙发育，水的渗入作用活跃有关^[1]。因此，可以通过追踪水库区域的P波或S波波速或 V_p/V_s 波速比来研究库区蓄水后地下介质的变化情况。

在我国波速比的研究已应用于许多水库地震中，并得到一些重要的结论：冯锐在新丰江6.1级水库地震前后的波速比变化研究中发现主震前波速比 V_p/V_s 出现了明显的负异常，且异常时间约为11个月，震前一个半月波速比又返回正常值^[2]；陈俊华等在三峡水库蓄水后巴东地区波速比 V_p/V_s 的研究中，采用固定台站法计算了区域 $M_L 2.0$ 级以上地震波速比，结果显示巴东地区地震波速比值变化与水库地震的震源浅，裂隙发育，水的渗入作用等有关，并存在扩容期间波速比降低，震前波速比回升的现象^[3]等；波速比的研究在四川省的水库中应用广泛，瀑布沟水库、紫坪铺水库、大桥水库等，不同水库在蓄水后波速比显示出了不同的特征和规律，为此，本文利用单台法计算了雅砻江锦屏一级

水电站水库蓄水后木里地区的地震波速比^[4]，为水库蓄水对该地区诱震及地下介质的变化提供参考。

1 锦屏一级水电站水库各阶段蓄水及木里地区地震活动概况

锦屏一级水电站作为雅砻江干流下游河段的控制性水库梯级电站，位于锦屏二级电站和官地水库的西北。库区干流回水至木里县卡拉乡，回水长度约为58 km；一级支流小金河回水至木里县后所乡嘎姑村嘎姑水文站附近，长度约为90 km；二级支流卧罗河回水至盐源县璧基乡卧罗村，长度为21 km。2011年11月1日起锦屏一级水库地震监测系统对库区及附近进行地震监测，其中该水库蓄水后（2012-11-30~2016-09-30）共分为四个蓄水阶段及正常运行期，在不同蓄水阶段，库区及附近的地震活动水平随库区加卸载呈现出了一定的相关性（图1），尤其在历史上少有地震发生的木里县项脚一带在蓄水7个月后频发地震并形成了震群。

第一阶段蓄水（2012-11-30~2013-06-15）：水位大约从（海拔高程：Elevation后面缩写为EL）EL.1648 m开始上升，2012年12月16日当水位达到约EL.1706 m，随后基本保持该水位至2013年5月31日，2013年6月1日至6月16日水位升至约EL.1735 m，该阶段地震活动较弱与蓄水前相比大致相当，主要以微小地震为主；

第二阶段蓄水（2013-06-16~2013-09-22）：水位大约从EL.1735 m开始上升，6月30日零时蓄至EL.1760 m水位，7月18日23时蓄至水位EL.1800 m，到达第二阶段蓄水水位高程，并维持到9月23日，该阶段水库迅速上升，同时地震活动水平也显著增强，地震活动高度集中在小金河支库区的木里县项脚乡附近占比较库区附近地震达到99.16%；

第三阶段蓄水（2013-09-23~2014-07-03）：2013年9月开始，10月15日到达EL.1839.57 m，维持这一阶段最高水位至2014年1月4日开始放水，2014年6月1日水位下降至EL.1800 m死水位，该阶段地震延续了第二阶段项脚乡附近地震频发且高度集中，高震级档 $M_L \geq 3.0$ 级地震明显增多，其中5次 $M_L \geq 4.0$ 级地震分别发生在2013年11月22日（3次）、2014年5月9

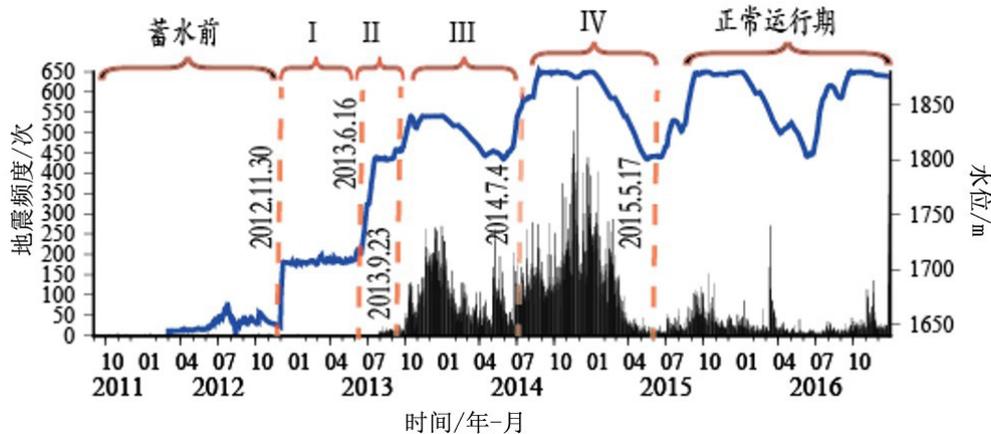
日及6月25日, M_L 4.6级地震为本阶段最大地震;

第四阶段蓄水期(2014-07-04~2015-05-16):

2014年8月24日库水到达 EL.1879.87 m 满库状态, 维持满库状态至2015年1月1日开始放水, 于2015年5月16日水位下降至 EL.1800 m 死水位, 小金河支库区项脚乡附近的地震活动分布与蓄水第三阶段相同, 较蓄水第二阶段覆盖范围大, 依然与水位保持了一定的相关性;

正常运行期从2015年5月17日开始, 与

蓄水第四阶段类似, 至2016年9月30日本阶段有完整的蓄放水循环过程, 项脚乡附近的地震活动分布与前三个阶段相同, 2015年9月随着水位蓄到满库状态, 地震月频度也达到蓄水阶段的峰值, 但在水位维持满库不变的情况下, 地震频度却逐渐降低, 这可能暗示着由于长期渗透作用小金河支库区下的介质逐渐调整至新的平衡。



(垂直虚线为不同阶段蓄水开始结束时间; 大括号和罗马数字表示蓄水阶段)

图1 锦屏一级水电站蓄水地震频次与水位对应随时间变化

Fig.1 Time variation of earthquake frequency and water level in Jinping Level I Hydropower Station

2 波速比变化的原理与计算方法

2.1 波速比的研究

当地震波通过强震的潜在震源区时, 其传播速度可能由于介质的不同发生变化, 变化量约为百分之几至百分之十几。波速比可由下式子计算得出:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \quad (1)$$

式中 λ 为应力, μ 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, 因而引起波速比的变化^[5]。

1.2 研究思路

在水库淹没区附近选取一丛较为集中的震群, 同时在震群周围分别选取两个对比台站以

及三个研究台站, 其中两个对比台站与震群在库水同侧, 认为其记录的 P_g 和 S_g 波并未穿越水库淹没区, 且选取的两个台站可相互验证; 选取的三个研究台站则在库水的另侧, 其记录的 P_g 和 S_g 波穿越了库水淹没区, 可能携带了由于库水荷载和渗透而造成的库区下方介质变化的信息。

波速比以区域小台网中多台记录资料计算, 用和达法可以达到较高精度^[6]。但为了突出穿过水库蓄水区域下的地震波变化情况, 研究采用了锦屏一级水库地震监测台网的定位精度以及记录较清晰的 $M_L \geq 2.0$ 级以上的地震, 用单台法计算了地震波速比, 由于方法的局限性, 所得到的波速数值波动较大, 但是采用的地震数据样本较为丰富, 因此阶段求均值变化趋势不受影响。

2.3 单台波速比计算公式

单台波速比由以下方法计算，设台站处在异常区域内，由震源到台站的距离为 R ，则纵、横波波速比可用下式求得：

$$v = \frac{v_p}{v_s} = \frac{v_p / R}{v_s / R} = \frac{T_s}{T_p} \quad (2)$$

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 (2) 式简化得：

$$v = 1 + \frac{t_s - t_p}{t_p - T_0} \quad (3)$$

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 v 值，可从记录图上直接按量取 t_s 、 t_p ，关键是求 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可以目录中的发震时刻为准^[7]。

3 资料选取情况

据锦屏一级水库地震监测台网记录，以木里县项脚乡一带 ($27.6^\circ \sim 28.2^\circ \text{N}$ 、 $101.1^\circ \sim 101.7^\circ \text{E}$) 为研究区域，选取了 2012 年 3 月至 2016 年 9 月 30 日水库蓄水后小金河以北，木里以西的项脚乡附近震群 $M_L \geq 2.0$ 级以上 1939 次地震进行单台波速比计算 (图 2)，其中 $M_L 2.0 \sim 2.9$ 级的 1747 次， $M_L 3.0 \sim 3.9$ 级的 183 次， $M_L 4.0 \sim 4.9$ 级的 9 次，地震震源深度均分布在 15 km 以内，平均深度为 6.97 km，2012 年 3 月至 2013 年 6 月 15 日是该库区蓄水前及蓄水第一阶段，这两个阶段里项脚乡及附近没有记录到 $M_L \geq 2.0$ 级以上地震，因此数据的处理计算从蓄水第二阶段开始。

选取了震群附近 5 个台站作为水库地震展布区内研究对象，其中芽祖台、列瓦台和白乌台三个台站作为研究台，且分别位于震群西南及以南，芽祖台震中距约为 7.4~17.4 km，列瓦台震中距约为 7.2~17.6 km，白乌台震中距约为 11.8~23.4 km，其记录的 P_g 和 S_g 波穿越库水淹没区，记录可能携带由于库水荷载和渗透作用造成的库区底部岩石变化的信息。同时选取木里台和白碉台作为对比台站，其中木里台位于震群以西，震中距约为 3.4~17.4 km，白碉台位于震群东北，震中距约为 10.6~20.2 km，认为对比台站记录的 P_g 和 S_g 波没有穿越库水淹没区。利用该区域地震 5 个台站记录的地震对其进行

波速比计算，通过各台站结果变化对比分析，提取雅砻江水库蓄水后随时间变化库区地下介质变化特点。

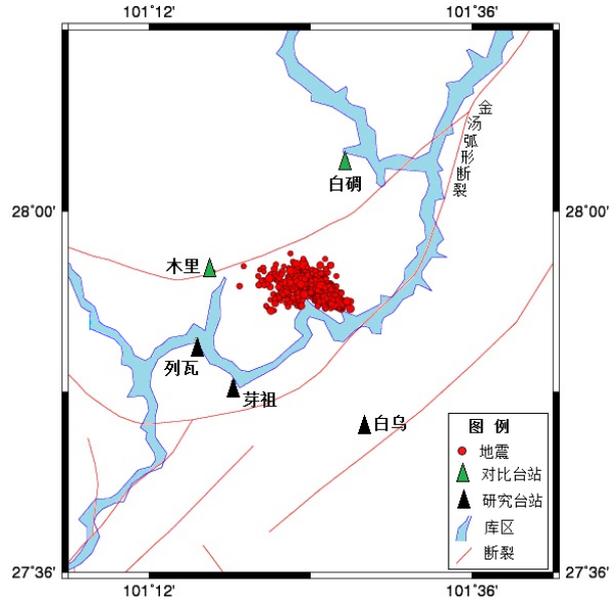


图 2 雅砻江波速比研究震群及台站分布图

Fig.2 Distribution map of earthquake swarms and stations in the study of wave velocity ratio in Yalong River

4 波速比变化与水库蓄水活动的关系

利用单台波速比方法计算出选取的 5 个台站总体结果为：白碉台记录地震 1279 次，波速比在 1.51~1.972 之间， $\bar{v}=1.759$ ；木里台记录到地震 847 次，波速比在 1.517~1.973 之间， $\bar{v}=1.803$ ；列瓦台记录到地震 1144 次，波速比在 1.511~1.967 之间， $\bar{v}=1.795$ ；芽祖台记录到地震 1064 次，波速比在 1.5~1.966 之间， $\bar{v}=1.794$ ；白乌台记录到地震 961 次，波速比在 1.517~1.993， $\bar{v}=1.847$ 。在水库正常运行期，列瓦、芽祖和白乌三个研究台站的波速比平均值均高于作为对比台的白碉台和木里台，且 5 个台站在正常运行期内波速比均值较蓄水前三个阶段均在不断增大，并高于均匀介质状态下的理论值，均值介于 1.814 至 1.891 之间，显著高于一般水库地震的波速比值^[3]。

将各蓄水阶段中 5 个台站记录到的地震事件分别进行了计算，并给出了各台站波速比随时间的演化进程，图中标示了每次地震事件的波速比，红色曲线为 15 次地震事件波速比的滑动平均趋势线，并将蓄水各阶段波速比均值结

果列于表 1 中，可见不同蓄水阶段各台站波速比均值呈现出一定的差异性：

(1) 第二阶段蓄水 (2013-06-16~2013-09-22)：白碓台记录到地震 147 次， $\bar{v}=1.678$ ，比均匀介质状态下的理论值小 0.054；木里台在该阶段没有地震记录，因此没有波速比计算；

列瓦台记录到地震 129 次， $\bar{v}=1.725$ 比理论值小 0.007，比白碓台高 0.047；芽祖台记录地震 85 次， $\bar{v}=1.697$ 比理论值小 0.035，比白碓台高 0.019；白乌台记录地震 132 次， $\bar{v}=1.788$ 比理论值大 0.056，比白碓台高 0.11。

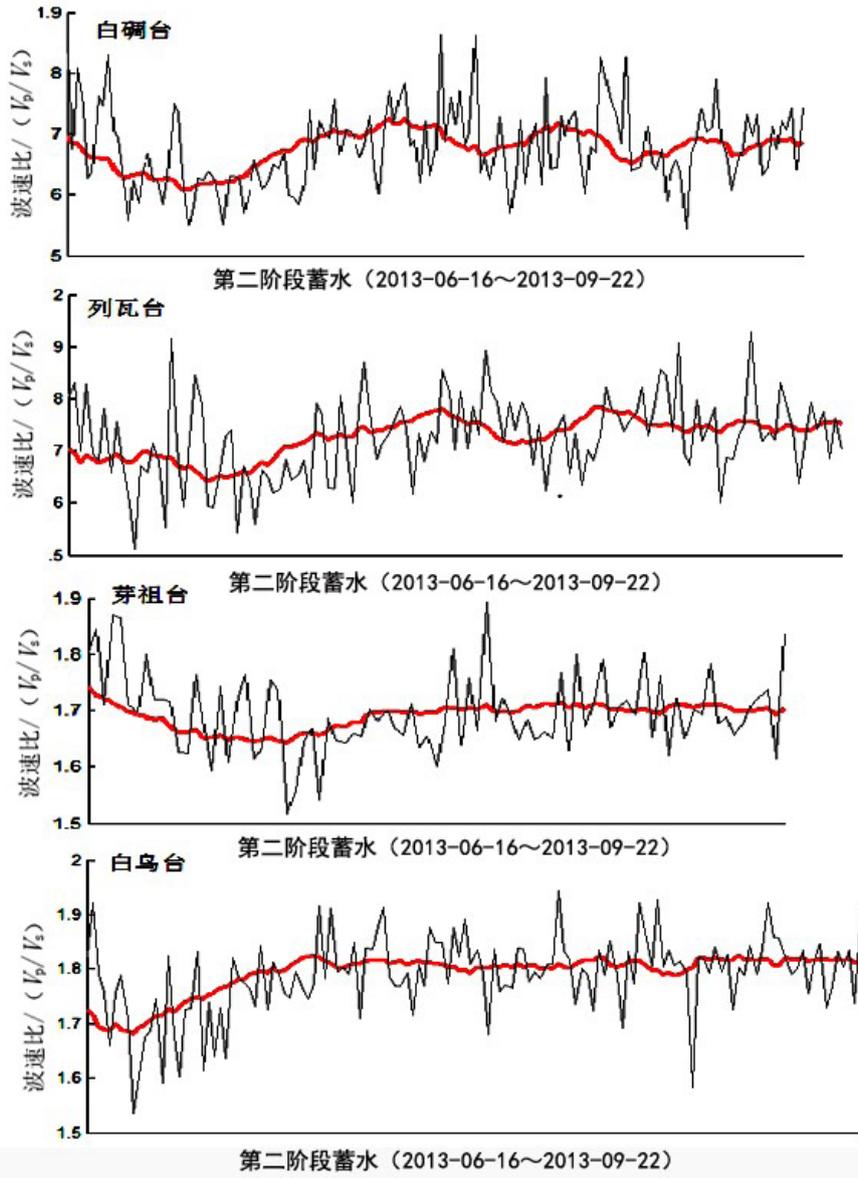


图 3 第二阶段蓄水期四个台站地震波速比随时间的演化进程
Fig.3 Evolution process of seismic wave velocity ratio with time at four stations
During the second impoundment period

(2) 第三阶段蓄水 (2013-09-23~2014-07-03)：在该蓄水阶段，延续了第二阶段蓄水并保持了较高水位 (图 1)，期间共记录 $M_L \geq 4.0$ 级地震 5 次，其中 2013 年 11 月 22 日共发生地

震三次，最大震级 $M_L 4.6$ 级，从图 4 可以看出，三次地震发生后 5 个台站均显示出了有波速比降低再上升的阶段，但从 2014 年 5 月 9 日及 6 月 25 日分别发生的 $M_L 4.2$ 、 $M_L 4.0$ 级地震前后，

并未发现明显的波速变化异常。

白碉台记录到地震 507 次, $\bar{v}=1.747$ 比均匀介质状态下的理论值大 0.015; 木里台记录到地震 261 次, $\bar{v}=1.775$, 比理论值大 0.043; 列瓦台记录到地震 466 次, $\bar{v}=1.779$ 比理论值大 0.047,

比白碉台大 0.032, 比木里台大 0.004; 芽祖台记录地震 434 次, $\bar{v}=1.779$ 比理论值大 0.047, 比白碉台大 0.032, 比木里台大 0.004; 白乌台记录地震 416 次, $\bar{v}=1.842$, 比理论值大 0.11, 比白碉台大 0.095, 比木里台大 0.067。

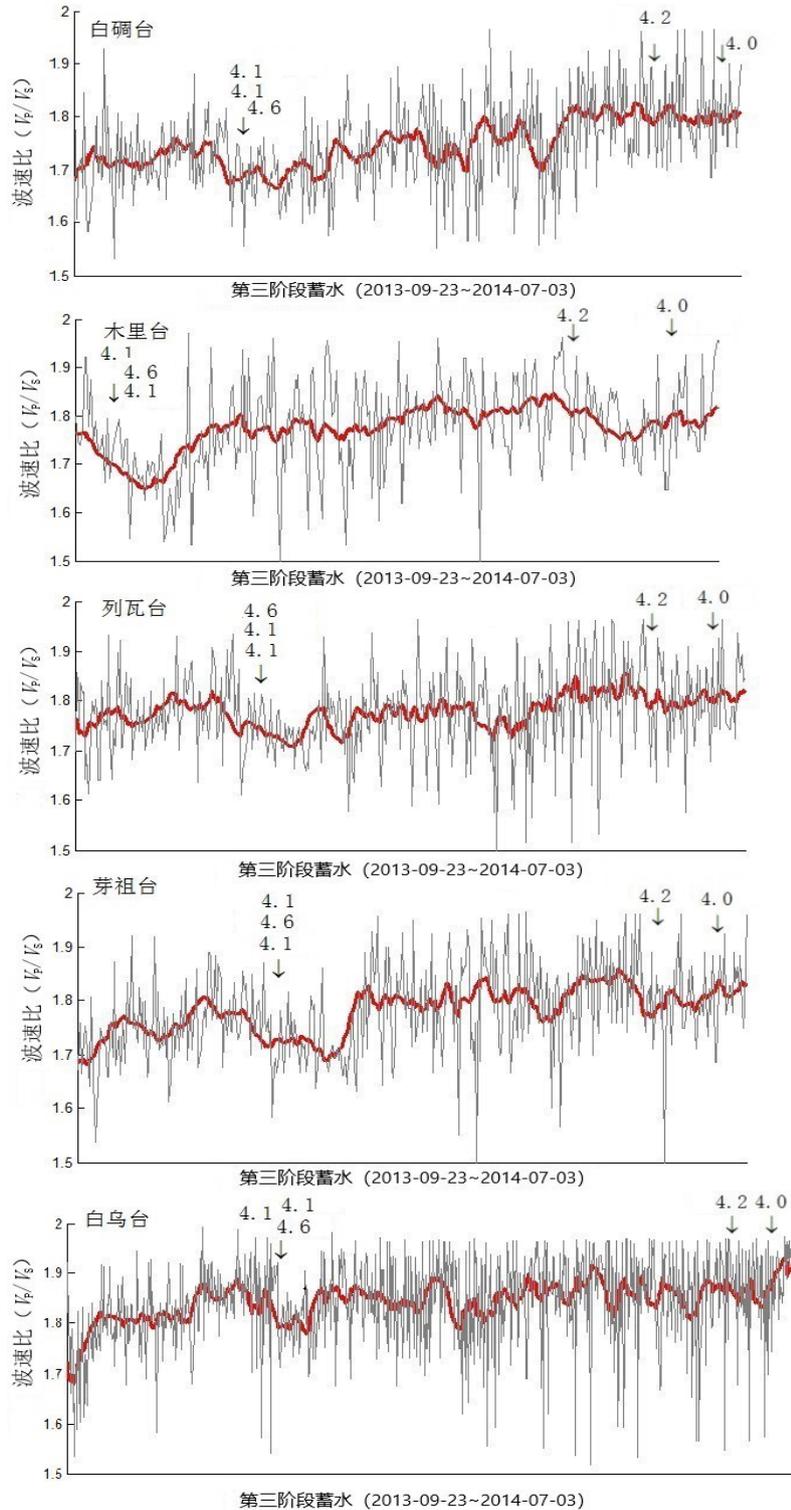


图 4 第三阶段蓄水期五个台站地震波速比随时间的演化进程

Fig.4 Evolution process of seismic wave velocity ratio with time at five stations during the third impoundment period

(3) 第四阶段蓄水(2014-07-04~2015-05-16): 白礅台记录到地震432次, $\bar{v}=1.798$, 理论值大0.066; 木里台记录到地震400次, $\bar{v}=1.808$, 比理论值大0.076; 列瓦台记录到地震393次, $\bar{v}=1.823$ 比理论值大0.1, 比白礅台大0.025, 比木里台大0.015; 芽祖台记录地震377次, $\bar{v}=1.834$ 比理论值大0.111, 比白礅台

大0.054, 比木里台大0.026; 白乌台记录地震308次, $\bar{v}=1.865$ 比理论值大0.133, 比白礅台大0.054, 比木里台大0.026。该蓄水阶段, 共记录 $M_L \geq 4.0$ 级地震3次, $M_L \geq 4.0$ 级地震前后未发现波速比异常, 同时随着库区的加卸载(图1), 波速比没有呈现出与水位的一致性。

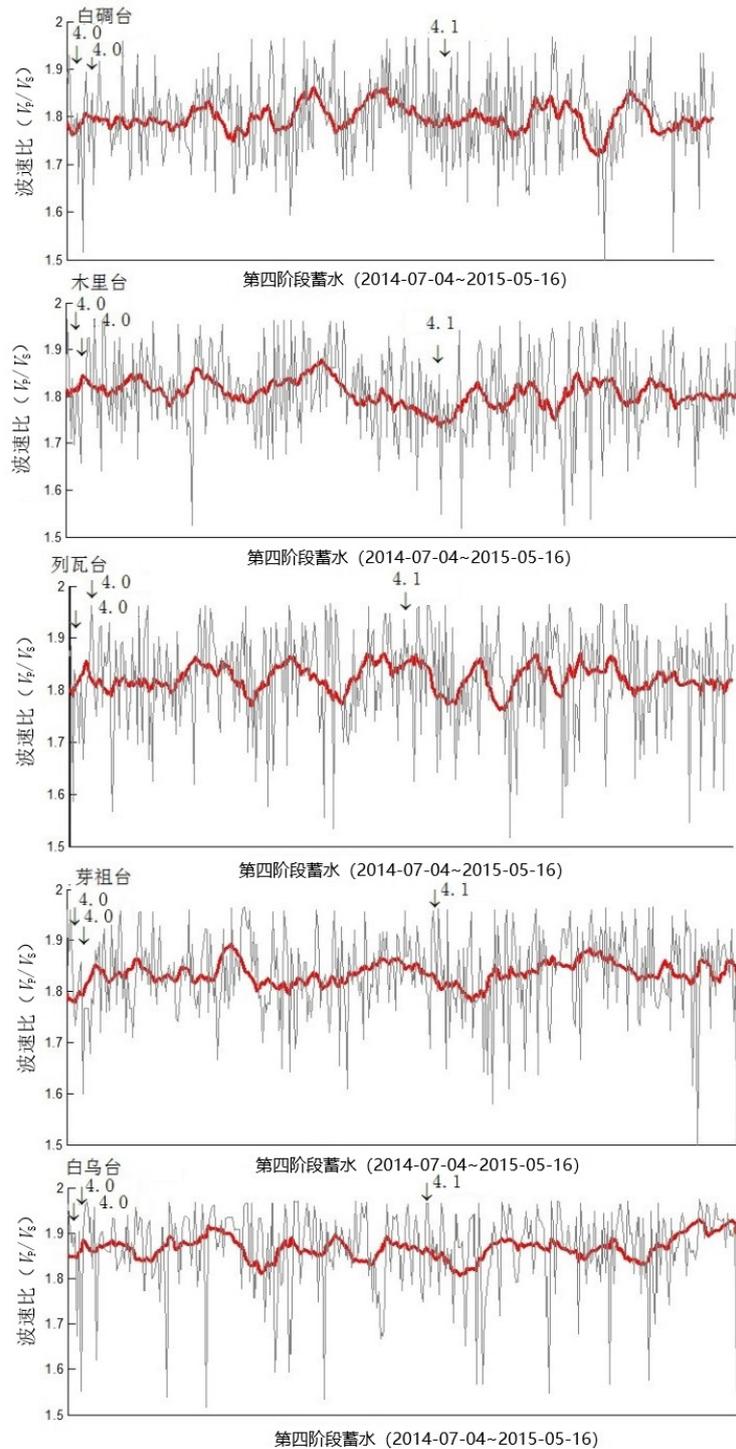


图5 第四阶段蓄水期五个台站地震波速比随时间的演化进程

Fig.5 Evolution process of seismic wave velocity ratio with time at five stations during the fourth impoundment period

(4) 水库正常运行期(2015-05-17~2016-09-30)：白碉台记录到地震 193 次， $\bar{v}=1.814$ 比理论值大 0.084；木里台记录到地震 186 次， $\bar{v}=1.825$ ，比理论值大 0.095；列瓦台记录到地震 156 次， $\bar{v}=1.853$ 比理论值大 0.123，比白碉

台大 0.039，比木里台大 0.028；芽祖台记录地震 168 次， $\bar{v}=1.867$ 比理论值大 0.137，比白碉台大 0.053，比木里台大 0.042；白乌台记录地震 105 次， $\bar{v}=1.891$ 比理论值大 0.161，比白碉台大 0.077，比木里台大 0.066。

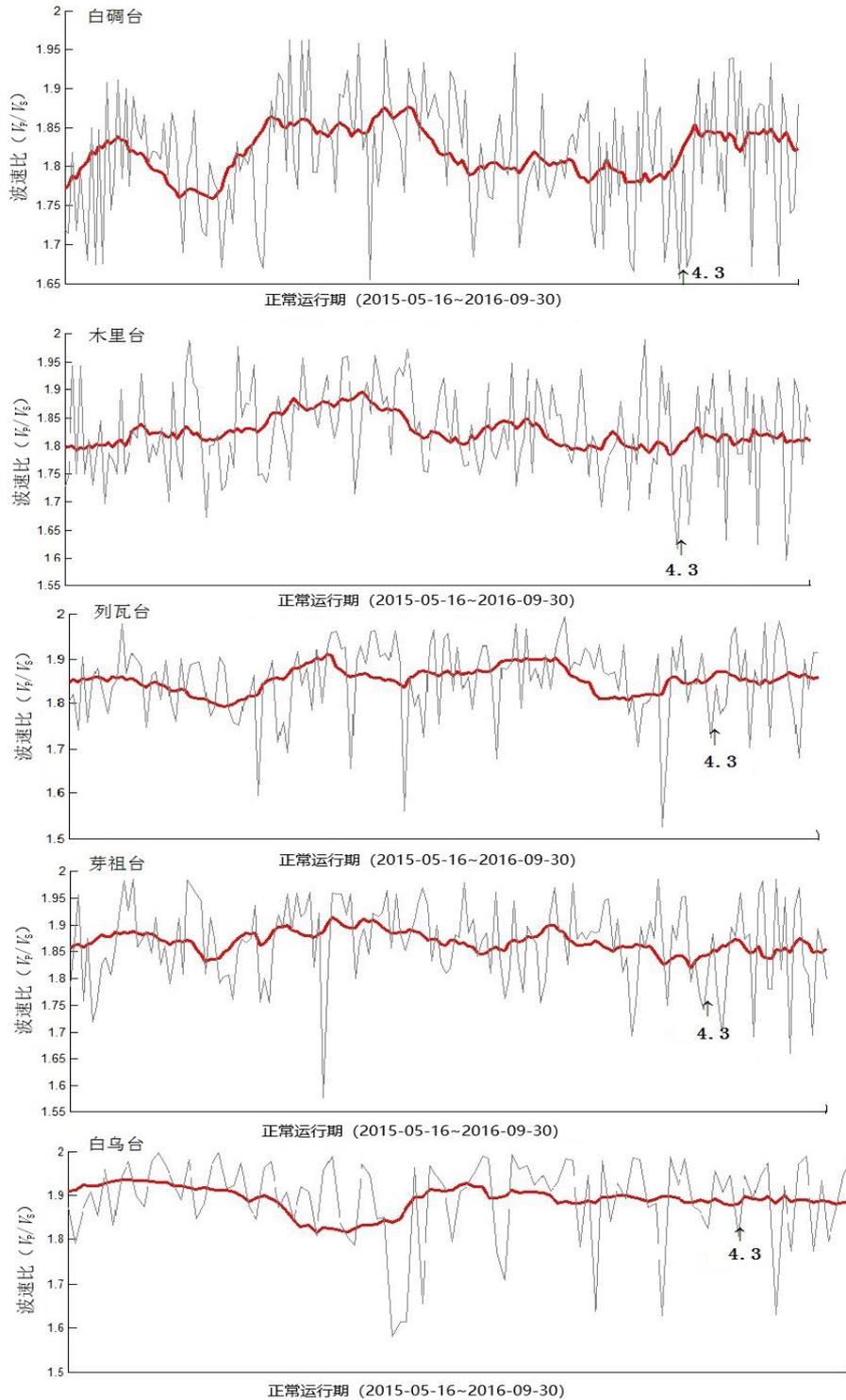


图 6 正常运行期五个台站地震波速比随时间的演化进程

Fig.6 Evolution process of seismic wave velocity ratio with time at five stations during normal operation period

五个台站在水库正常运行期波速比结果显示,在不同蓄水阶段以及正常运行期,对比台白碓台与木里台波速比均值相比过水的三个研究台均值幅度小,其中白碓台与木里台 \bar{v} 为

1.814和1.825,而列瓦台 \bar{v} 为1.853分别高出对比台0.039和0.028,芽祖台 \bar{v} 为1.867分别高出对比台0.053和0.042,白乌台 \bar{v} 为1.891分别高出对比台0.077和0.066,可见穿过水库蓄

水区域下方的地震波射线所反映出的波速比相比未过库水的台站变化更为明显。2016年3月11日的 $M_L 4.3$ 级地震,是正常运行期内发生的最大一次地震,在该地震前后并未看出波速比有明显的高值或低值异常,波速比在时间进程内没有有明显变化趋势。但随蓄水时间演化进程可见五个台站在各个阶段的波速比均值均呈逐渐上升趋势(表1)。

表1 雅砻江水库波速比均值计算结果

Table 1 Calculation results of mean of wave velocity ratio of Yalong River Reservoir

时段	白碓台		木里台		列瓦台		芽祖台		白乌台	
	记录地震 / (次)	波速比								
第二阶段蓄水 (2013-06-16 ~2013-09-22)	147	1.678			129	1.725	85	1.697	132	1.788
第三阶段蓄水 (2013-09-23 ~2014-07-03)	507	1.747	261	1.775	466	1.779	434	1.779	416	1.842
第四阶段蓄水 (2014-07-04 ~2015-05-16)	432	1.798	400	1.808	393	1.823	377	1.834	308	1.865
正常运行期 (2015-05-17 ~2016-09-30)	193	1.814	186	1.825	156	1.853	168	1.867	105	1.891
总体	1279	1.759	847	1.803	1144	1.795	1064	1.794	961	1.847

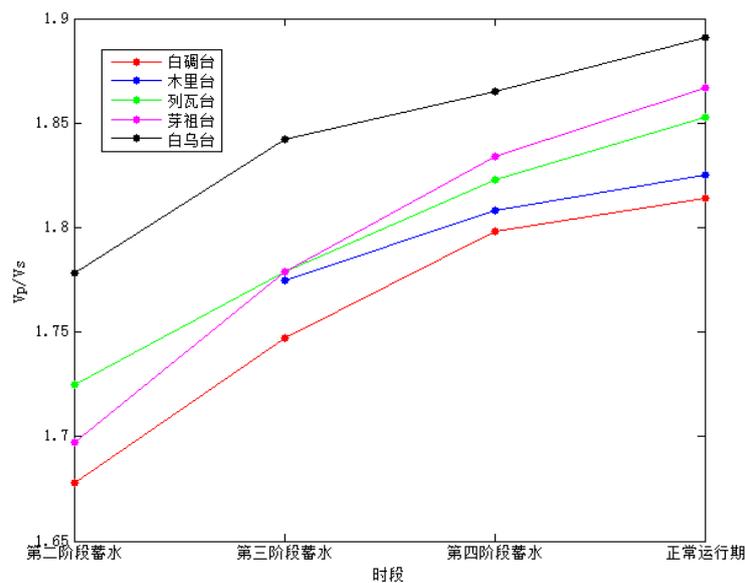


图7 各蓄水阶段与正常运行期五个台站的平均波速比变化

Fig.7 Variation of average wave velocity ratio of five stations during each impoundment stage and normal operation period

5 结论

本文选取了木里地区项脚乡附近 5 个台站并分别利用单台波速比方法对雅砻江锦屏一级水电站蓄水前后的波速比进行了对比分析,从图 7 可直观看出,随着水库蓄水活动的进行,5 个台站计算的各阶段平均波速比变化呈现出一致的逐渐升高现象。其中两个对比台站即木里台与白碉台波速比计算结果均显示,其波速比变化明显小于三个研究台,分析认为:引起波速比变化的主要因素是岩体裂隙和空隙变化,岩体渗水后的软化,以及裂隙中流体饱和度等因素。波速比 V_p/V_s 的变化主要体现在高值上,其实质是 V_s 偏低,造成 V_s 偏低的原因可能是该区地壳富含水,水流改变了某些层位的流变性,由于其流变性质的增强,形成脆性层位,也就是地震容易发生的层位^[3]。

该研究区域的地震主要选取分布在雅砻江库区 1~11 km 范围内,离水库库区较近,水库蓄水后,随着蓄水时间及库水加卸载的变化,并随着库水逐渐渗透,使蓄水前的饱气带蓄水后变为饱水带,在 2012 年 3 月至 2016 年 9 月的波速比研究结果显示,5 个台站在各蓄水阶段波速比均值逐渐增大,说明库水的不断渗透逐渐改变了库区及附近介质,对库区及附近区域范围地下结构有较大影响。

参考文献:

- [1] 姚立珣,钟羽云,张震峰,等.岩体裂隙充水后对拐角频率的影响[J].地震工程学报,2004,26(4):315-321.
- [2] 冯锐.新丰江 6.1 级水库地震前后的波速比变化[J].地球物理学报,1977,20(3):211-221
- [3] 陈俊华,甘家思,李普丽,等.三峡水库蓄水后巴东地区波速比 (V_p/V_s) 研究[J].大地测量与地球动力学,2007,27(F06):12-14.
- [4] 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(3):215-221.
- [5] 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.
- [6] 梅世蓉,冯德益.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993.
- [7] 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.