

# 小湾水库蓄水前后的水库地震波速比变化初探<sup>\*</sup>

李永莉, 赵小艳, 付虹

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用小湾水库地震台网连续、完整的地震波资料, 计算小湾水库蓄水前、后各1年地震密集区域的小震波速比变化, 并分析3级地震震前波速比的显著异常变化特征。结果表明: 小湾库区澜沧江段的昌宁、凤庆, 黑惠江库区的巍山牛街一带为震群丛集区, 且库尾凤庆区域平均波速比低于中段的昌宁区, 空间上呈非均匀分布。水库蓄水仅对凤庆区的地下介质有一定的影响, 蓄水前后3级地震震前波速比均呈显著低值异常, 2009年8月6日凤庆3.5级地震为蓄水后的最大地震, 初步判定为水库诱发的构造地震或构造型水库诱发地震。

**关键词:** 小湾水库; 水库蓄水; 波速比; 水库诱发地震

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2012)04-0464-07

## 0 引言

对水库诱发地震的研究结果表明可通过追踪水库区域波速比来反映水库诱发地震的地下介质变化情况。理由如下: 一是流体载荷作用, 通过水体重力对库区地下岩体的加载, 使孔隙减小引起孔压变化; 二是孔压扩散, 由于水库在水头作用下渗透扩散, 导致渗流场孔压变化; 三是由于水填充了原“干燥”裂隙断层, 降低了断层活动的摩擦阻力, 只要有小的应力扰动, 容易引起岩石破裂。而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。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(傅淑芳等, 1980)。

近年来随着观测条件的显著改善和新技术新方法的引入, 水库诱发地震前也能监测到地震波速比的变化。如新丰江  $M_s 6.1$  水库诱发地震前, 水库地震台网记录到的波速比出现明显的负异常(丁原章, 1989)。新丰江水库、龙羊峡水库诱发地震的波速比异常与天然地震的有所差别(冯德益等, 1993)。又如, 用高质量的数字地震记录计算得到的2006年2月4日至4月3日温州珊溪水库地区  $M_L \geq 2.0$  地震的平均波速比, 在较强地震前观察到持续的低值异常现象等(邹振轩等, 2006)。

2005年5月云南省建立了第1期小湾水库数字地震台网, 共12个子台, 主要围绕小湾库区及其以北50 km内的范围; 第2期地震台网建于2009年, 共5个子台, 分布在第1期台网以北的库首区, 于2009年9月中旬联网运行。小湾水库于2008年12月开始蓄水, 蓄水前后水库数字地震台网均有较连续、完整的地震波资料, 利用2007~2009年的地震波资料, 计算小湾水库蓄水前、后各1年地震密集且台网控制较好的区域的小震波速比变化, 并分析显著  $M_L 3.0$  地震前波速比变化特点, 提取小湾水库蓄水前后与库区显著地震前的水库区域地下介质变化特点。

## 1 计算方法及公式

设台站处在异常区内, 震源到台站的距离为  $R$ , 则纵、横波速比为

$$V = \frac{V_P}{V_S} = \frac{V_P/R}{V_S/R} = \frac{T_S}{T_P} \quad (1)$$

式中,  $T_S$ 、 $T_P$  分别为 S 波和 P 波走时,  $T_S = t_S - T_0$ ,  $T_P = t_P - t_0$ , 将其代入(1)式简化得:

$$V = 1 + \frac{t_S - t_P}{t_P - T_0} \quad (2)$$

式中,  $t_S$  为 S 波到时,  $t_P$  为 P 波到时,  $T_0$  为发震

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金(41174051)“小湾水库蓄水前后地球物理场动态变化特征研究”项目资助.

时刻。利用 (2) 式求波速比  $V$  值, 可从图纸上直接量取  $t_s$ 、 $T_p$  (王海涛等, 1992),  $T_0$  一般为多台和直达线定出的平均发震时刻, 文中以小湾水库地震台网地震目录中的发震时刻为准。

为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地震前后的变化, 笔者使用 2007 年以后定位准确的小湾水库数字地震台网记录地震的观测报告, 使用式 (2) 进行单台波速比计算。选取 1~2 个单台进行研究, 要求其记录的  $P_g$  和  $S_g$  穿越库水淹没区, 记录可能携带由于库水荷载或渗透作用造成的库区底部介质变化信息。同时选用 1~2 个未穿越库水淹没区的单台地震波记录, 对同一地区地震将几个单台的计算结果对比分析, 追踪波速比在库区地震前的变化特征。

2 小湾水库概况与地震背景

小湾水库为澜沧江中段 3 个水利枢纽工程中规模最大的一个, 坝高最大值为 292 m, 总库容为 149.14 亿  $m^3$ 。小湾电站坝段正好位于漫湾水库的回水末端, 与漫湾电站相距约 60 km。小湾库区有澜沧江断裂带和无量山断裂带通过 (图 1), 这两条断裂带均具有复杂的断裂结构和数百米宽的破碎带, 其中澜沧江断裂带纵贯近 180 km 长的澜沧江主干河库区。从小湾库区通过的澜沧江断裂从走向上可分为两段, 在小湾坝址附近为近东西走向, 坝址西永新以北至功果桥, 断裂呈北西走向。无量山断裂带是进入小湾库区的又一条重要的断裂带, 其北段在牛街一带穿过了黑惠江库区 (毛玉平等, 2006)。小湾水库 2005 年 11 月截流, 2008 年 12 月 16 日开始蓄水, 其主要的水库区有两个: 第一库区是沿小湾坝址到功过桥间的澜沧江主干河分布库区, 长 179.6 km; 电站的第二大库区沿黑惠江分布, 库尾在徐村电站附近, 库区长 125 km, 属于高坝大型电站水库。小湾水库的构造环境、库容水量、库坝高度等具备水库诱发地震的条件。

图 1 为 2007~2010 年小湾水库地震台网记录到的  $M \geq 2.0$  地震震中分布, 从图中可见蓄水前黑惠江库区的巍山以北与漾濞交界处一带为小地震密集区, 蓄水后密集区则南移至巍山牛街一带, 其余水库库区的中小地震分布格局在蓄水前后 2 年无明显的差异。挑选出库区周围 20 km 内 (图 1 不

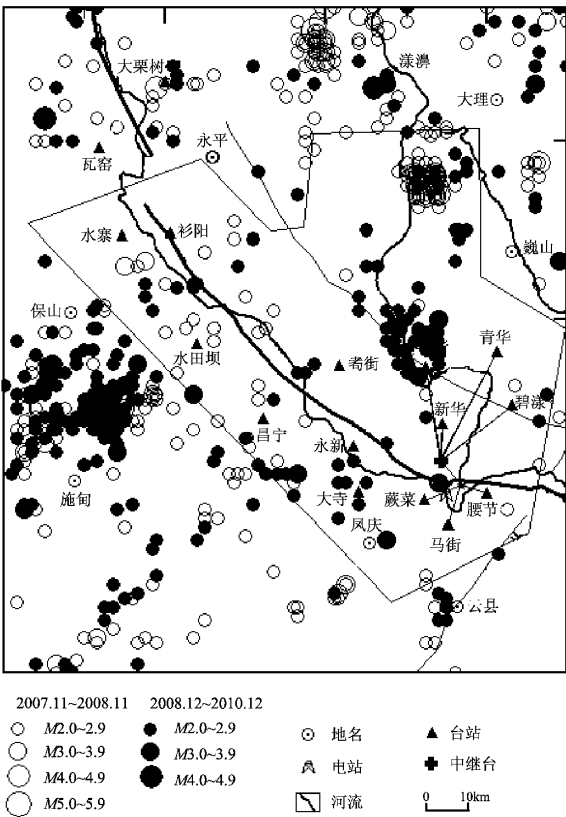


图 1 2007~2010 年小湾水库地震台网记录到的地震震中分布

Fig. 1 Epicenter distribution of earthquakes recorded by Xiaowan Reservoir Network from 2007 to 2010

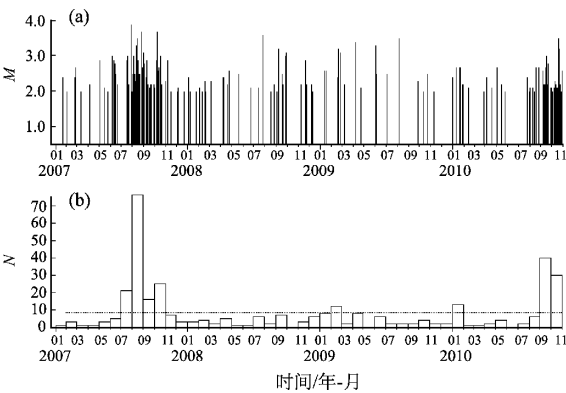


图 2 小湾水库周围 20 km 内  $M \geq 2.0$  地震  $M-t$ 、 $N-t$  曲线

Fig. 2  $M-t$  and  $N-t$  curves of  $M \geq 2.0$  earthquakes occurred within 20 km around the Xiaowan Reservoir

规则黑框所示区域, 简称库区) 的地震 (图 2), 由于 2007 年 6 月 4 日宁洱 6.4 级地震对滇西南地

区有增频影响,库区东北边的巍山于 2007 年 7~9 月发生了小震群,共有两次 4 级地震,最大地震为 8 月 12 日的 4.5 级,最大月频次为 8 月份(76 次),而其余时间段地震强度、月频次差异均不大;尤其是蓄水前、后各 1 年的地震月频次、最大地震强度无明显变化。2008 年最大月频次为 9 月(7 次),最大地震为 2008 年 7 月 26 日昌宁的 3.6 级地震,月平均发生 3.4 次。2009 年最大月频次为 2 月(12 次),最大地震为 2009 年 8 月 6 日凤庆 3.5 级地震,月平均发生 4.8 次。而 2008 年 12 月 16 日水库开始蓄水至 2009 年 5 月水位变化较小,最大地震为 4 月 7 日凤庆 3.4 级地震。2009 年 6~8 月水位大幅度上升至最高位,6 月小湾水库支库区昌宁珠街一带的黑惠江两侧地震集中发生,7 月库区澜沧江段的风庆永新至大寺段发生滑坡事件,2009 年 8 月 6 日凤庆境内澜沧江与黑惠江交汇处附近发生最大地震 3.5 级。2010 年 10 月 21 日无量山断裂带北段黑惠江库区的巍山牛街一带发生最大为 3.5 级地震的震群,小震群分散于黑惠江两岸且较为复杂,无法分辨台站记录的某一地震是否穿过淹水区,同时该区域 2010 年以前主要为 1 级地震活动,3 年内仅发生过 4 次 2 级地震。

3 水库分区域的波速比分析

综合库区小地震活动分布与水库地震台站分布情况,昌宁区(24.6°~24.9°N, 99.6°~99.8°E)、凤庆区(24.4°~24.8°N, 99.9°~100.2°E)两个小震密集区的地震满足蓄水前后均为地震多发、地震台记录到的地震波穿过淹水区的条件。

3.1 昌宁区

该区域附近地区 40 km 范围内有 3 个单台:昌宁、耆街与永新台,后两个台记录的地震波均穿过了水库区的水体。分析 3 个单台记录的波速比时间进程曲线(图 3),可见 2007~2009 年昌宁台、耆街台、永新台波速比平均值分别为 1.61、1.59、

1.59,相差不大;而在蓄水前、后 1 年时段内,3 个台波速比平均值分别为 1.61、1.59、1.59(表 1),观测水库蓄水前、后的波速比形态、数值无明显差异,平均值波动不大。2008 年 12 月 16 日水库蓄水后,昌宁台 12 月 20 日波速比为 1.613,12 月 27 日为 1.76;耆街台 12 月 25 日波速比为 1.538,12 月 27 日为 1.6,2009 年 1 月 4 日波速比为 1.8;永新台 12 月 20 日波速比为 1.591,12 月 25 日为 1.578,2009 年 1 月 4 日波速比为 1.611,3 个台波速比均出现高于均值线,变化幅度和大小不等。

2007~2009 年间昌宁区共发生 3 次 3 级以上地震分别为:2008 年 7 月 26 日 3.6 级、2008 年 9 月 8 日 3.2 级与 2009 年 2 月 19 日 3.2 级地震。库区 3 级地震的波速比响应分别为:昌宁台波速比 2008 年 2~6 月均低于均值线,回升后发生 7 月 26 日 3.6 级地震,8 月又低于均值线,9 月 8 日的

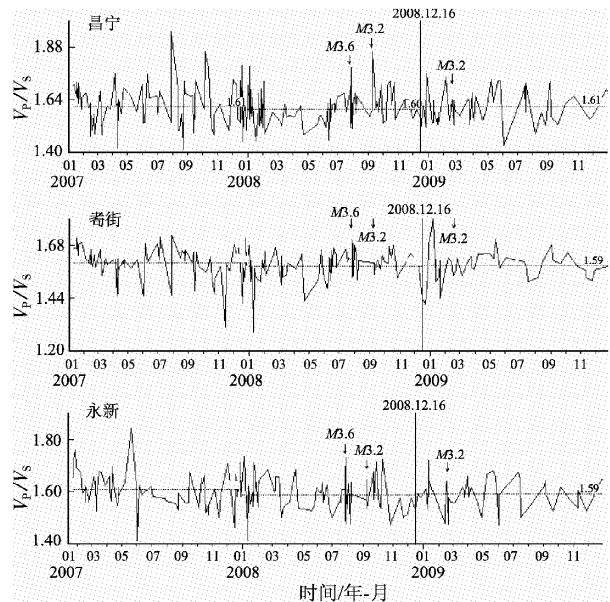


图 3 昌宁区的单台波速比时间曲线  
Fig. 3 Wave velocity ratio curve of the single station in Changning area

表 1 昌宁区蓄水前后波速比变化特征

Tab. 1 Variation characteristic of wave velocity ratio before and after water storage in Changning area

时段	地震次数			波速比均值			临震特征		
	昌宁台	耆街台	永新台	昌宁台	耆街台	永新台	昌宁台	耆街台	永新台
蓄水前(1年)	108	100	90	1.60	1.59	1.59	低回升	低回升	低回升
							低值		低值
蓄水后(1年)	50	41	44	1.61	1.59	1.59	低—高	低回升	低回升

3.2 级地震发生于波速比回升过程中。2009 年 1 月波速比又出现低于均值的数值，回升至均值以上后 2 月 19 日发生了 3.2 级地震；肴街台波速比 2008 年 3~6 月均低于均值线，回升后发生 3.6 级地震，之后一直在均值线上波动，9 月 8 日的 3.2 级地震前波速比变化不明显，2009 年 1 月波速比又出现低于均值的数值，回升过程中 2 月 19 日发生了 3.2 级地震；永新台 2008 年 3~9 月波速比均低于均值线且发生了 7 月 26 日 3.6 级地震与 9 月 8 日的 3.2 级地震，2009 年 1 月波速比高于均值，下降后发生 2 月 19 日的 3.2 级地震。

3.2 风庆区

风庆区共有 3 个单台：蕨菜、马街与新华台，其中新华台记录的风庆区的地震波穿过了水库区的水体，由 3 个单台记录的波速比时间进程曲线可见（图 4）：2007~2009 年蕨菜、马街、新华台的平均波速比分别为 1.55、1.54、1.58。从数值看新华台的平均波速比高于其余两台。蓄水后 1 年内，3 个台的波速比平均值分别为 1.55、1.54、1.58（表 2）。2007~2009 年水库蓄水前、后 3 个台的波速比形态无明显差异，但马街台与新华台蓄水后的波速比平均值均升高。2008 年 12 月 16 日水库蓄水后，蕨菜台 12 月 28 日波速比为 1.654，马街台 12 月 28 日波速比为 1.556，12 月 29 日波速比为 1.643，新华台 12 月 28 日波速比为 1.68，3 个单台的波速比值均出现高于均值的点，变化幅度及大小不等。

2007~2009 年间风庆地区共发生两次 3 级以上地震分别为：2009 年 4 月 7 日 3.4 级与 2009 年 8 月 6 日 3.5 级地震，蕨菜台波速比在 2009 年 3 月

18 日至 4 月 1 日出现低于均值的数值，之后在回升到均值线上的过程中发生了 3.4 级地震，2009 年 5~6 月波速比均低于均值线，7 月 15 日回升至均值线以上的过程中发生了 3.5 级地震；马街台波速比从 2009 年 1 月 20 日至 4 月 1 日在均值线下波动，4 月 3 日出现 1.595 的高值后发生了 4 月 7 日的 3.4 级地震，2009 年 5~6 月波速比均低于均值，7 月 15 日回升至均值线以上发生了 8 月 6 日 3.5 级地震；新华台波速比从 2009 年 2 月 28 日至 4 月 27 日均低于均值，低值过程发生了 3.4 级地震，2009 年 6 月 30 日至 7 月 19 日波速比均低于均值，7 月 21 日回升至均值以上再下降后发生了 3.5 级地震。

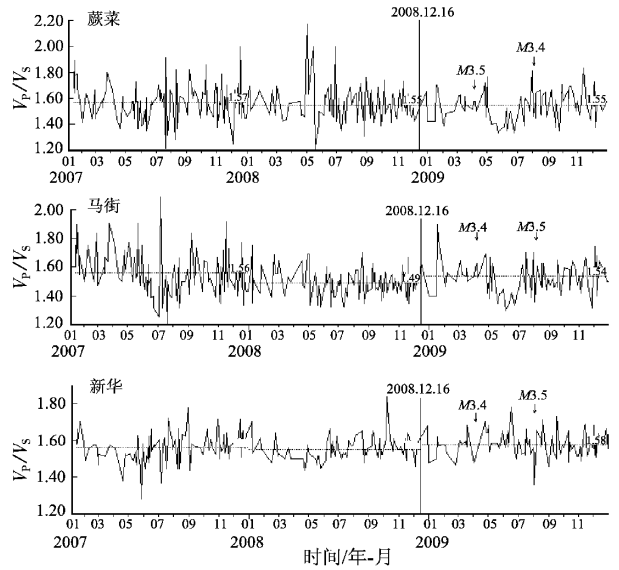


图 4 风庆区的单台波速比时间曲线  
Fig. 4 Wave velocity ratio curve of single station in Fengqing area

表 2 风庆区蓄水前后波速比变化特征  
Tab. 2 Variation characteristic of wave velocity ratio before and after reservoir storage in Fengqing area

时段	地震次数			波速比均值			临震特征		
	蕨菜台	马街台	新华台	蕨菜台	马街台	新华台	蕨菜台	马街台	新华台
蓄水前（1 年）	99	99	87	1.55	1.49	1.55			
蓄水后（1 年）	112	110	100	1.55	1.54	1.58	低回升	低回升	低值
							低—高	低回升	低值

总之，昌宁区的区域平均波速比高于风庆区，昌宁区单台记录的波速比在蓄水前、后无明显变化，蓄水后 1 年内记录到的地震频次为蓄水前的一半。风庆区的单台记录的波速比在蓄水前、后变化各有不同，蕨菜台的平均波速比无变化，马街

与新华台平均波速比在蓄水后均出现了增大，蓄水后 1 年内记录到的地震频次比蓄水前约多 10%。昌宁区与风庆区的平均波速比，在水库蓄水初期几天单台的波速比均出现了波速比升高现象，而在 3 级临震前所有单台波速比均呈低值异常，与穿

过或未穿过淹水区域无关。

4 凤庆 3.5 级地震性质的讨论

2008 年 12 月 16 日水库蓄水后的 1 年, 水库小范围内的最大地震为 2009 年 8 月 6 日凤庆 3.5

级地震, 震源深度为 3 km, 2009 年 6~8 月为水库水位大幅度上升至最高位的阶段 (图 5), 2009 年 8 月 6 日于凤庆境内澜沧江与黑惠江交汇处附近发生的最大地震 3.5 级, 与水库水位变化关系较密切。从水位变化、震源深度与地震的关系分析, 凤庆 3.5 级地震初步定为水库诱发地震。

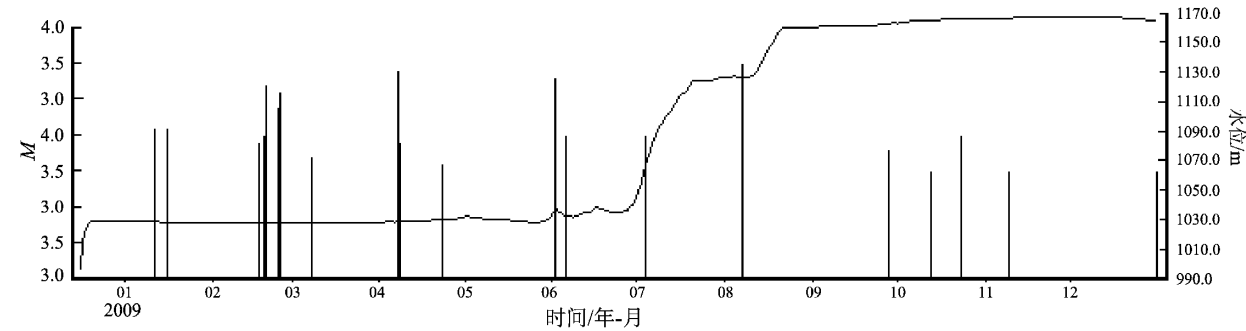


图 5 水库蓄水与库区地震  $M-t$  图  
Fig. 5 Reservoir storage and  $M-t$  curve of the earthquakes occurred in reservoir area

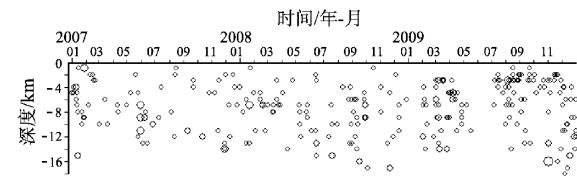


图 6 凤庆区  $M \geq 1.0$  地震震源深度  
Fig. 6 Focal depth of  $M \geq 1.0$  earthquakes in Fengqing area

从凤庆区  $M \geq 1.0$  小震震源深度时间分布可看出 (图 6), 该区域 1 级小震的地震震源深度在蓄水后仅呈现 1~5 km 的增多, 但大多数地震震源深度在蓄水前、后均分布于 10 km 内, 空间分布上无明显差异, 仅以此难于确定凤庆 3.5 级地震为水库诱发地震; 而蓄水后凤庆区地震频度仅增加 10%, 仅有马街、新华台单台波速比增大, 同时 3 个单台波速比在 2009 年 8 月 6 日凤庆 3.5 级地震前均呈低值异常, 与地震波是否穿过淹水区域无关, 可见水库蓄水对凤庆区的地壳介质有一定的影响, 但未有实质性的改变, 由于小湾库区处于云南天然小震或震群多发地, 从震源深度、频度增加、波速比变化角度均无法分辨其为水库地震还是天然地震, 即 2009 年 8 月 6 日凤庆 3.5 级地震的水库诱发地震特征不明显。

据丁原章 (1989) 研究表明, 水库诱发地震是库水渗透增大岩体内的孔隙压力, 导致断裂面

或结构不连续面上有效应力减少和抗剪强度降低而发生的地震。目前将水库诱发地震从成因上分为构造型、裂隙型和岩溶型 3 类, 构造型水库诱发地震是库水沿断裂渗透时, 由于库水的各种物理化学作用, 促使断裂面的抗剪强度降低而诱发的地震。根据小湾库区水库诱发地震的地质环境特点分析 (阚荣举, 韩源, 1992; 毛玉平等, 2006), 笔者认为小湾库区水库诱发地震活动的主要因素是沿通过库区的澜沧江断裂带及其次级断层, 和无量山断裂带发生的构造型水库诱发地震; 而小湾库区在主压应力近南北到北北东向的现代构造应力场作用下, 通过小湾库区的澜沧江主干河库区西段 (永新至功过桥段) 的澜沧江断裂处于易于发生剪切破裂的应力场背景, 将是构造型水库诱发地震的多发地段。2009 年 8 月 6 日凤庆 3.5 级地震正好处于该区域, 因此, 凤庆 3.5 级地震初步判定为水库蓄水诱发的构造地震或构造型水库诱发地震。

5 问题与结论

(1) 经本文分析后, 初步认为 2009 年 8 月 6 日小湾库区的凤庆 3.5 级为水库蓄水诱发的构造地震或构造型水库诱发地震。一方面小湾水库蓄水前、后各 1 年所有的 3 级地震前的波速比变化临震前均呈低值异常, 同时蓄水前后各单台波速比变

化与震中距大小,与地震波是否穿过淹水区域的水库位置无关,而水库蓄水前后1年凤庆区的地震频次增幅较小,均表明蓄水对小湾库区影响较小,似乎凤庆3.5级地震更倾向为天然构造地震;另一方面,从小湾库区岩性、坝高、库容、库区断层及水位变化的密切关系分析,则认为该次地震应为诱发地震,两者之间存在较大的矛盾。

在已经建成的水库中,只有部分水库有诱发地震报道,在这些地震中,根据Packer等(1979),Baecher和Keeney(1982)对20世纪80年代以前的资料统计,认为水库诱发地震的发生比例仅占12%。即使考虑受地震记录、记载影响,水库诱发地震资料可能存在完整性的欠缺,目前也没有证据说明水库与水库诱发地震存在必然因果关系(耿乃光等,1992)。因此,库区岩性、坝高、库容、库区断层和水库诱发地震间也可能并不存在普遍的相关性。目前,中强和微小水库诱发地震与库区断层的可能联系尚处于争论之中(李华晔,1999)。因此,凤庆3.5级地震只能初步判定为水库蓄水诱发的构造地震或构造型水库诱发地震,仍缺乏充足的依据作进一步判定。

(2)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(梅世蓉,冯德益,1993)。但为了突出穿过水库蓄水区域下的地震波的变化情况,文中采用了小湾台网较准确的定位精度,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仍较大,文中计算结果的准确率受到一定程度影响,但变化趋势不受影响。因此,该方法以趋势的改变来判定波速比变化,数值的细微差值仅为参考,具有一定的局限性。

(3)图3、图4所示昌宁区的单台波速比平均值高于凤庆区,两区域的平均波速比最大相差约5%。虽然计算单台波速比的方法精度不高,分析波速比的结果时应当考虑震中距对波速比的影响,但文中选取的地震与台站之间的震中距均小于50 km,地震分布相对集中在所选取计算的范围中,震中距对波速比的影响已降到最低,因此,得到澜沧江段库区中段的波速比高于库区尾段的结论,具有一定的可信度,但目前地震数量相对较少,有待下一步补充资料,充实修正结果。

(4)小湾水库蓄水后,穿过水库淹水区的耆街台、永新台的单台波速比平均值无明显变化,

而新华台的单台波速比则增大;未穿过水库淹水区的昌宁台、蕨菜台波速比平均值无变化,马街台的波速比则增大,表明单台波速比变化与是否穿过水库淹水区无关,目前水库蓄水对澜沧江断裂的库区中段与库区尾段无显著影响。但从构造上分析澜沧江断裂具有压扭性质,以挤压逆冲为主,破碎强烈,错动、变质现象极为普遍,断裂两侧发育有一系列规模不大的北东西向张性断层(毛玉平等,2004),水库蓄水后的库水有可能出现对断裂的渗透,而促使断裂面的抗剪强度降低而诱发地震的危险;同时,小湾库区昌宁区、凤庆区的单台波速比值在1.49~1.61之间,远远低于滇西南地区的区域平均波速比1.70(李永莉等,2008),均不排除小湾库区未来存在发生诱发地震的可能性,有必要对小湾库区继续深入的跟踪研究。

综上所述,小湾库区地震主要沿澜沧江、黑惠江分布,丛集的现象主要分布于水库中段至库尾:分别集中于澜沧江段的昌宁、凤庆,黑惠江库区的巍山牛街一带,库尾凤庆区域平均波速比低于中段的昌宁区,空间分布上呈非均匀性。水库蓄水对昌宁区的地下介质无影响,水库蓄水后,该区域地震明显减少,对该区域有减压、卸载的作用;而水库蓄水对凤庆区的地下介质有一定的影响,目前还未有实质性改变,水库蓄水后地震频次增加10%,对该区域有增压,加载的作用,可能会成为未来诱发地震的区域。蓄水前、后显著3级地震临震前的单台波速比均呈低值异常,与蓄水、穿过或未穿过淹水区域无关。2009年8月6日凤庆3.5级地震初步判定为水库蓄水诱发的构造地震或构造型水库诱发地震。

## 参考文献:

- 丁原章. 1989. 水库诱发地震[M]. 北京:地震出版社.
- 冯德益,虞雪君,盛国英. 1993. 波速异常的进一步研究和问题讨论(三)——水库诱发地震前的 $V_P/V_S$ 异常[J]. 西北地震学报, 15(3):38-43.
- 傅淑芳,刘宝诚,李文艺,等. 1980. 地震学教程(下册)[M]. 北京:地震出版社.
- 耿乃光,郝晋升,李纪汉,等. 1992. 岩石的波速比与静水压的关系[J]. 地震学报, 14(4):501-506.
- 阚荣举,韩源. 1992. 云南遮放—马龙地质断面[M]. 北京:地震出版社.
- 李华晔. 1999. 水库诱发地震与环境关系的研究[J]. 华北水利水电学院学报, 20(1):32-37.

- 李永莉,毛慧玲,赵小艳,等. 2008. 云南地区数字地震波波速比的区域特征[J]. 地震研究,31(3):203-208.
- 毛玉平,王洋龙,李朝才. 2004. 澜沧江水利枢纽工程中段水库诱发地震地质环境分析[J]. 地震研究,27(增刊):63-69.
- 毛玉平,王洋龙,李朝才. 2006. 小湾库区水库诱发地震地质环境分析[M]//水库诱发地震监测与研究. 昆明:云南科技出版社.
- 梅世蓉,冯德益. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社.
- 王海涛,敖雪明,杨马陵,等. 1992. 单台地震预报的地震学方法

- [M]. 北京:地震出版社.
- 邹振轩,李金龙,俞铁宏. 2006. 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,26(4):133-137.
- Baecher G B, Keeney R L. 1982. Statistical Examination of Reservoir-induced Seismicity[J]. Bull Seismol Soc Am,72:553-569.
- Packer D R, Cluff L S D, Knuepfer P L, et al. 1979. A study of Reservoir Induced Seismicity[R]. Woodward Clyde Consultants U S A, U S Geol Surv, Contr Nr 14-08-001-16809, unpubl, report.

## Research on Variation of Wave Velocity Ratio before and after Water Storage for Xiaowan Reservoir

LI Yong-li, ZHAO Xiao-yan, FU Hong

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Using continuous and complete data of small earthquakes recorded by Xiaowan Reservoir Seismic Network, we calculate the variation of seismic wave velocity ratio for one year before and after water storage of Xiaowan Reservoir in earthquake cluster area, and analyze significant anomaly of wave velocity ratio before  $M3.0$  earthquakes. The results indicate that earthquake swarm area distributes on Changning and Fengqing Counties of Lancang River Fault in Xiaowan Reservoir and Niujie Township in Weishan County in Heihuijiang Reservoir. The wave velocity ratio of Fengqing area in back reservoir is lower than that of Changning area in the middle of the reservoir, and it distributes non-uniform in space. The water storage of reservoir has certain influence on the underground medium in Fengqing area. The wave velocity ratio before  $M3.0$  earthquakes appears lower value anomaly before water storage. An Fengqing  $M3.5$  earthquake occurred on Aug. 6 in 2009, which is the biggest earthquake in Xiaowan Reservoir after water storage, and induced to be the tectonic earthquake induced by reservoir or tectonic reservoir-induced earthquake.

**Key words:** Xiaowan Reservoir; water storage; wave velocity ratio; reservoir-induced earthquake