

利用背景噪声研究福建金钟库区地壳介质波速变化^{*}

胡淑芳¹, 李 军¹, 戴宗辉², 李 强¹, 蓝 姝¹

(1. 福建省地震局, 福建 福州 350000; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 基于2011年10月—2015年12月福建测震台网金钟库区周边台站的连续波形数据, 利用地震背景噪声互相关技术提取台站对间的经验格林函数, 分周期(1~2 s, 2~4 s和4~8 s)测量每天经验格林函数与参考格林函数的走时偏移, 进而计算了库区各台站对之间的相对地震波速变化。结果表明: 2~4 s周期内地下介质相对波速变化表现出夏高冬低的年变规律, 与库区水位变化及当地降雨量存在明显的正相关性, 说明在此周期范围内, 水位变化及降雨量对波速变化的影响最大。2013年8—10月, 仙游地区接连发生了4次 $M_L \geq 4.0$ 地震, 其中在2013年9月4日仙游震群最大 $M_L 5.0$ 地震发生后, 波速变化出现趋势性下降, 幅度约为0.1%, 随后波速逐渐恢复, 在整个震群活动后期, 对库区介质波速的影响不明显。

关键词: 背景噪声; 金钟库区; 相对波速变化; 水位

中图分类号: P313.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2021)01-0049-07

0 引言

金钟水库位于福建莆田仙游县境内, 属于大Ⅱ型水库, 坝高97.5 m, 正常蓄水位245 m, 总库容1.06亿 m^3 。2010年5月水库开始蓄水, 3个月后库区附近出现地震活动。根据中国小震目录^①, 仙游震群周边地区属少震、弱震区。金钟水库蓄水后, 发生密集地震活动, 水库水位对整个震群序列活动的调制作用十分明显, 发震时间表现为丛集—平静的特征, 这种现象在水库蓄水诱发地震的震例中较为普遍, 如龙滩水库(陈翰林等, 2009)、紫坪铺水库(陈颀, 2009; 周斌等, 2010)、长江三峡水库(马文涛等, 2010)以及自贡—荣昌地区(张致伟等, 2012)等。因此, 李强等(2015)认为仙游震群序列可能是由金钟水库蓄水诱发引起的水库地震。

目前, 关于水库地震的研究多集中于库区水位、库区地震及库区介质三者之间的关系。周斌等(2010)讨论了水库诱发地震时空演化与库水加卸载的动态响应关系; Liu等(2014)应用汶川

地震震源区附近的小口径地震台阵三分量连续波形资料研究了震源区同震和震后波速变化的时间过程及其与深度的依赖关系; 安艳茹和张晓东(2015)利用背景噪声研究了紫坪铺水库水位的加卸载对库区地下介质波速的影响。总之, 水库的蓄水会对地下介质产生影响, 而利用背景噪声互相关技术研究库区地下介质和应力场变化则是行之有效的办法。

本文基于2011年10月—2015年12月福建测震台网金钟库区周边台站的连续观测数据, 利用地震背景噪声相关技术研究库区介质变化与库区水位变化、降雨量及库区地震之间的关系, 探讨水库水位、地震活动等因素对库区地下介质波速变化的影响。

1 数据及方法

1.1 仙游震群序列活动特征与金钟水库水位

自2010年8月以来, 仙游地区出现明显的地震活动, 小震活动频次与金钟水库水位变化密切相关(图1), 按照丛集—平静的特征可将仙游震

^{*} 收稿日期: 2019-10-18.

基金项目: 2019年度震情跟踪定向工作任务(2019010115)、地震科技星火计划项目(XH19021Y)和国家自然科学基金面上项目(41774068)联合资助。

第一作者简介: 胡淑芳(1984-), 工程师, 主要从事地震监测和分析预报方面的研究. E-mail: 282081391@qq.com.

^① <http://10.5.160.18/uniteDayCatalog/index.action>.

群序列分为 5 个不同时间段：Ⅰ时段为 2010 年 8 月—2011 年 4 月，该时段水库已经蓄水，但未记录水位资料，地震活动水平偏低，以 $M_L \leq 3.0$ 的小震活动为主，震级和频次水平均较低；Ⅱ时段为 2011 年 12 月—2012 年 8 月，该时段水库水位处于下降过程，地震活动的频次和强度水平有所提升，发生序列中第一次 $M_L \geq 4.0$ 地震，即 2012 年 4 月 15 日仙游 $M_L 4.1$ 地震；Ⅲ时段为 2012 年 11 月—2013 年 6 月，该时段水库水位处于上升过程，地震活动以 $M_L \geq 3.0$ 震群活动为主；Ⅳ时段为 2013 年 7 月—2014 年 8 月，该时段水库水位经历了下降—上升 2 个过程，地震活动最为强烈，发生 4 次 $M_L \geq 4.0$ 地震，最大地震为 2013 年 9 月 4 日仙游 $M_L 5.0$ 地震；Ⅴ时段为 2014 年 9 月—2015 年 12 月，该时段水库水位亦经历了下降—上升 2 个过程，地震活动呈高频次、低震级的特点（胡淑芳等，2018）。

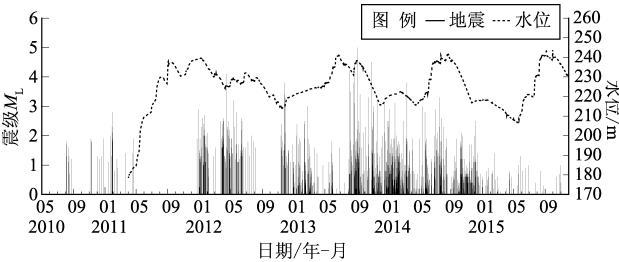


图 1 金钟水库水位变化与仙游震群 $M-T$ 图
Fig. 1 The water level change of Jinzhong reservoir and $M-T$ map of Xianyou earthquake swarm

1.2 观测数据

福建省测震台网建有 88 个测震台，平均台间距约为 30 km，沿海地区台间距约为 20 km。台网内的地震定位精度可达 I 类（震中误差 ≤ 5 km）。为了更好地反映金钟库区蓄水及引发的地震对周边介质波速的影响，所选取的地震台站应大致均匀分布于库区周边（刘志坤，黄金莉，2010），具体台站分布如图 2a 所示。将图 2a 中震源区（黑色方框）放大显示，如图 2b 所示，从图中可以看到，金钟水库、仙游震群以及所取计算台站（XY-SC）的相对位置情况。参与计算的各地震台观测系统主要技术参数见表 1。

本文所用的数据为福建省测震台网 8 个地震台站记录的垂直分量连续波形（段刚等，2017），由于在仙游震群密集活动之前金钟库区的周边台站

表 1 各地震台观测系统主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of the seismic observation system in each seismic station

台站名称	台站代码	地震计	频带范围	采样率/Hz
永泰盖洋	YTGy	CMG-3ESPC	120 s ~ 50 Hz	100
永泰葛岭	YTGL	CMG-3ESPC	120 s ~ 50 Hz	100
永泰富泉	YTFQ	BBVS-60	60 s ~ 50 Hz	100
仙游西苑	XYXY	CMG-3ESPC	120 s ~ 50 Hz	100
仙游石苍	XYSC	CMG-3ESPC	120 s ~ 50 Hz	100
莆田荔城	PTLC	CMG-3ESPC	60 s ~ 50 Hz	100
福清东张	FQDZ	CMG-3ESPC	60 s ~ 50 Hz	100
德化唐寨	DHTZ	CMG-3ESPC	120 s ~ 50 Hz	100

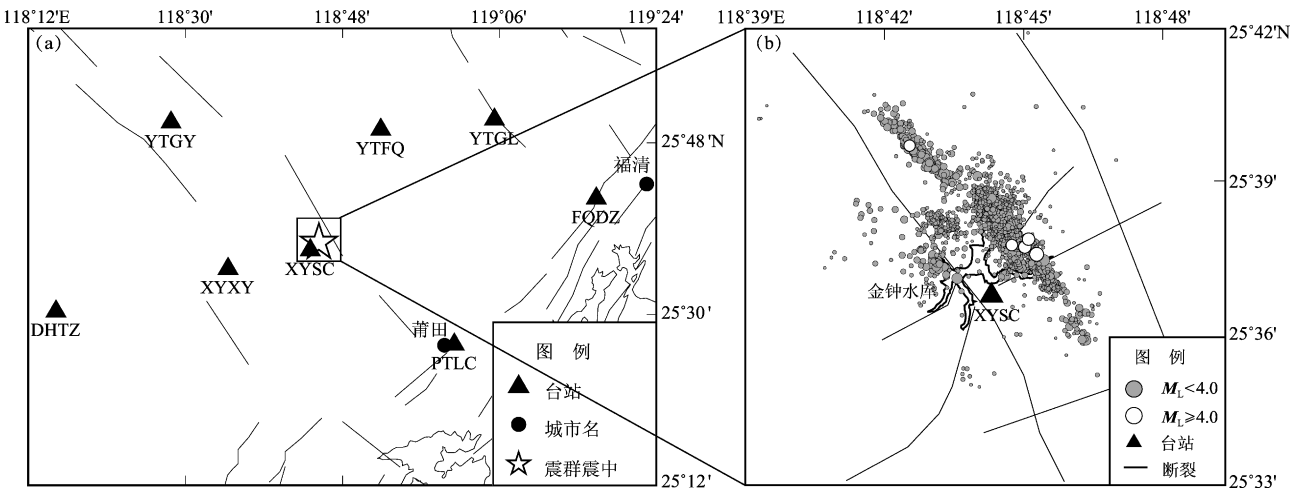


图 2 研究区及地震台站分布 (a) 及金钟水库位置及仙游震群震中分布 (b)

Fig. 2 Distribution of the study area and seismic stations (a), and the location of the Jinzhong reservoir and distribution of epicenters of the Xianyou earthquake swarm (b)

较少,所以最终选用的数据资料时间范围为2011年10月—2015年12月,可参与计算地震台站的可用数据统计结果如图3所示,图中白色部分表示可用数据的日期, N 表示每天可用的台站数。由图可见,大部分台站自建台以来的数据均连续可用(YTGY, YTGL, XYXY, DHTZ为2011年10月、XYSC为2012年8月、YTFQ为2014年2月新建台站),为本文研究提供了坚实的数据基础。

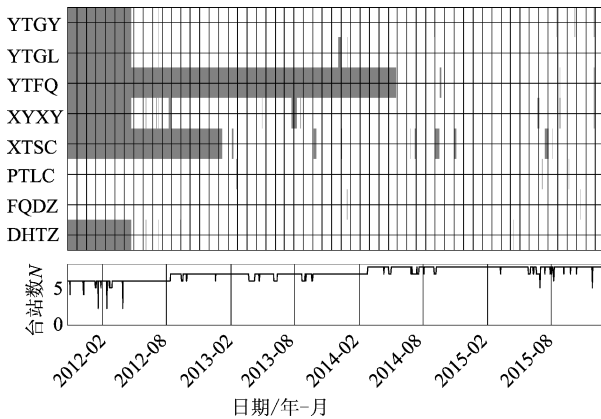


图3 各台站数据可用性图

Fig. 3 Data availability for each station

1.3 理论基础与数据处理

本文使用MSNoise软件(Lecocq *et al*, 2014)完成地下介质波速相对变化的提取,具体数据处理流程主要包括4个步骤:

(1) 单台数据预处理:降低地震等干扰对噪声的影响,获得比较纯净的地震背景噪声。对于每个台站,将连续波形数据拼接为一天的数据段,对其进行重采样(20 Hz),并去除均值、去线性趋势、滤波(0.1~2 Hz),再采用滑动窗口绝对值平均的方法对波形进行时域归一化,最后在0.1~1 Hz频带下进行谱白化处理,使信号在不同频率上的能量更为均衡。

(2) 互相关计算与叠加:通过互相关运算提取格林函数并进行叠加。利用所获得的背景噪声数据,计算所有台站对间的经验格林函数。为了提高信噪比及结果的稳定性,将各台站对当天及其前、后15天(共31天)的互相关函数叠加作为该天的经验格林函数(当前格林函数),可以得到2011年10月—2015年12月各台站对每天的经验格林函数。图4显示了以DHTZ-XYXY台站对

为例的当前格林函数叠加结果,不同颜色表示归一化振幅的大小。从图中可以看到清晰稳定的面波和尾波信号,说明在整个研究时段内当前格林函数是稳定可靠的,图中的绿色实线为DHTZ-XYXY台站对选取计算的时间窗口(5~35 s)。

为了定量计算台站对间经验格林函数随时间的变化,需要确定各台站对的参考格林函数。研究表明背景噪声源的季节性变化会引起由互相关方法重构的面波信号的走时变化,所以应尽量用较长时间范围(至少1年)的资料确定参考经验格林函数(刘志坤,黄金莉,2010)。因此根据可以收集到资料的时段,本文将2013年1月—2015年12月各台站对较稳定的互相关函数进行叠加作为参考格林函数。

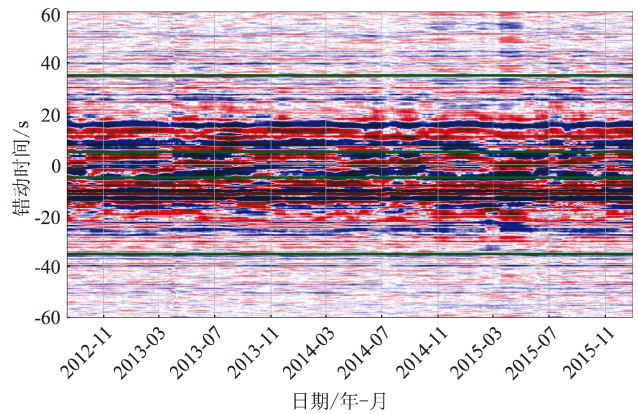


图4 DHTZ-XYXY台站对叠加后格林函数的能量干涉图

Fig. 4 Energy interferogram of Green's Functions after superposition of DHTZ-XYXY stations

(3) 走时偏移计算:本文采用移动窗口互谱方法计算相对走时变化(Ratdomopurbo, Poupinet, 1995; Clark *et al*, 2011)。该方法首先将序列的当前格林函数(CC_{cur})与参考格林函数(CC_{ref})分成许多重叠的窗,去平均、尖灭处理,然后进行傅里叶变换得到 $F_{cur}(f)$ 和 $F_{ref}(f)$ 。对应窗口的当前格林函数与参考格林函数的互相关谱 $X(f)$ 定义为:

$$X(f) = F_{ref}(f) \cdot F_{cur}^*(f) \quad (1)$$

式中: f 为频率。

利用互相关谱计算2个波形间的时间偏移的前

提条件是,二者之间应该是相似的,其相似度以二者在频率域中能量密度的相关一致性 $C(f)$ 进行评估。 $C(f)$ 值介于 0~1, 值越大表示 2 个波形的相似度越高。

式 (1) 变换为振幅与相位形式, 可得:

$$X(f) = |X(f)| e^{i\varphi(f)} \quad (2)$$

其中, 将互相关谱的相位 $\varphi(f)$ 展开, 可得:

$$\begin{aligned} \varphi_j &= m \cdot f_j \\ m &= 2\pi\delta_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中: j 表示第 j 个窗口。

由式 (3) 可见, 互相关谱的相位 $\varphi(f)$ 与频率 f 成线性关系, 比例系数为 m 。因此, 根据式 (3), 对研究频率范围内的频率-相位进行加权线性回归, 便可计算获得时间偏移 δ_i , 对应的误差为 e_m , 对应的权重为 w_j :

$$w_j = \sqrt{\frac{C^2}{1 - C_j^2}} \cdot \sqrt{|X_j|} \quad (4)$$

式中: C_j 是相关系数; X_j 为互谱。这种权重公式的优势在于, 能够在相关一致性近似相同而互相关谱能量不同时给出不同的权重系数。

式 (3) 中 m 的计算误差 e_m 定义为:

$$e_m = \sqrt{\sum_j \left(\frac{w_j f_j}{\sum_i w_i f_i^2} \right)^2 \sigma_\varphi^2} \quad (5)$$

式中: σ_φ^2 为数据拟合差的平方。

根据式 (3), 分别对 m 和 e_m 除以 2π , 即可获得台站对间对应于不同时间错动的走时延迟 δ_i 及误差 e_{δ_i} 。

(4) 相对地震波速度变化的计算: 假设介质波速沿空间是均匀变化的, 则相对波速变化与相对走时偏移具有以下关系 (Breguier *et al*, 2008):

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{\delta t}{t} \quad (6)$$

式中: δv 和 δt 分别为介质波速变化量和走时偏移。根据上述关系, 利用走时偏移即可获得相对波速的相对变化。对于 3 个计算周期, 分别通过最小二乘加权线性回归获得走时偏移变化, 为了

减小误差, 拟合时要求直线强制通过原点 (Lecocq *et al*, 2014)。

2 结果分析

本文选取 8 个地震台站共组成 28 个台站对, 按照上述的数据处理方法分别提取了各个台站对地下介质的相对波速变化。为了更好地反映库区地下介质的整体变化情况, 本文对各个台站对间的波速变化进行平均, 获取平均相对波速变化。另外, 为了更有效地约束库区水位对地下不同深度介质波速的影响, 本文采用分周期测量的方法。主要通过 3 个周期 1~2 s (0.5~1.0 Hz), 2~4 s (0.25~0.50 Hz), 4~8 s (0.125~0.250 Hz) 计算, 得到了地下数百米至 10 km 深度地下介质的波速变化 (图 5)。

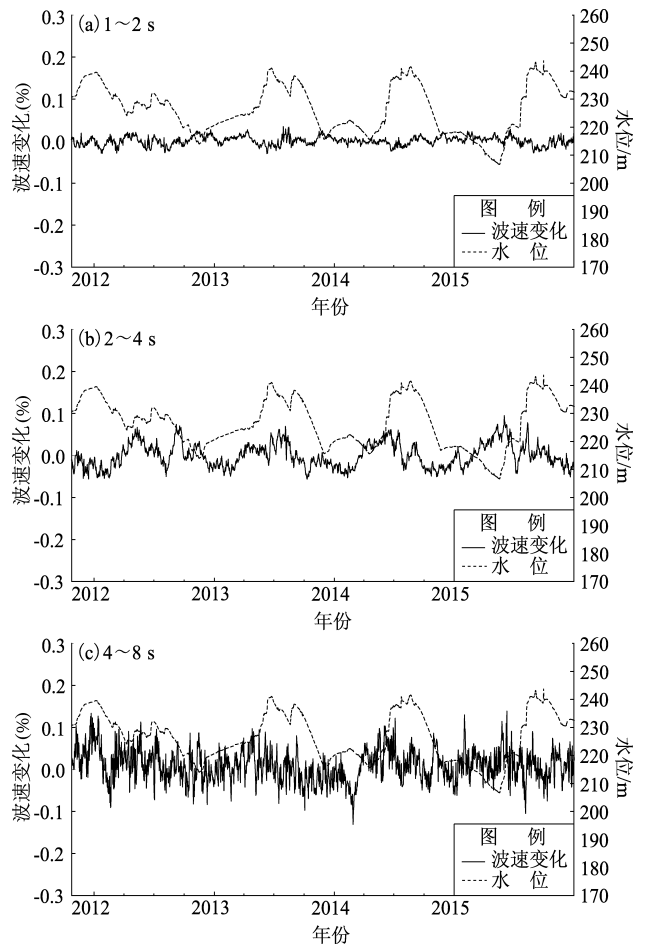


图 5 金钟库区 3 个周期的地下介质平均相对波速变化与库区水位

Fig. 5 The average relative seismic velocity changes for underground medium in three periods and water level in Jinzhong reservoir area

2.1 库区水位对波速影响

1~2 s 周期内波速变化最为平稳, 变化幅度在 $\pm 0.05\%$ 之间, 与水位的相关性不强 (图 5a)。2~4 s 周期内波速变化幅度在 $\pm 0.1\%$ 之间, 整体上呈现出夏高冬低的季节性变化规律, 与库区水位变化存在较为明显的正相关性 (图 5b)。尤其在 2013—2014 年, 库区水位升高, 介质的相对波速增加; 水位下降, 波速也随之降低, 说明 2~4 s 周期内水位变化对波速变化的影响最大。分析其原因可能是水库在经历长时间大规模蓄水后, 水压力对波速的影响起到了决定性作用。4~8 s 周期内波速变化较大, 幅度约为 $\pm 0.1\%$, 季节性变化基本消失, 与水位变化的相关性减弱 (图 5c)。

2.2 降雨量对波速影响

基于背景噪声计算的地壳介质波速变化会受周边环境扰动的影响, 如降雨量、温度和气压等 (Wang *et al.*, 2017)。因此, 笔者收集莆田地区的降雨量资料, 对比分析 2~4 s 周期库区地下介质波速变化与降雨量之间的关系 (图 6), 从图 6 可以看出, 波速变化与降雨量成明显正相关性。2012—2015 年, 每年的波速变化都随着降雨量的增多而增大; 反之, 每年的降雨量减少时, 波速变化也随之减小。分析其原因可能是雨量的增加, 导致岩石孔隙中流体的总重量增加, 进而使得该区域上覆岩层净压力增加, 从而造成波速的增大。

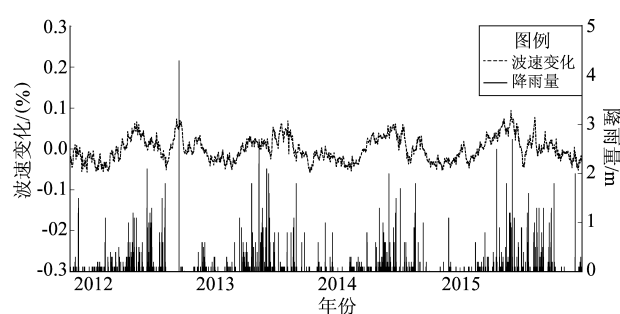


图6 金钟库区 2~4 s 周期地下介质平均相对波速变化与莆田地区降雨量

Fig. 6 The average relative seismic velocity changes for underground medium in Jinzhong reservoir area in 2~4 s period and precipitation in Putian region

2.3 仙游震群序列对波速影响

从仙游震群序列震源深度时变和频度图 (图 7) 可以看到, 地震的震源深度主要集中在 10 km

以内, 平均深度约为 9.4 km, 所以选择 4~8 s 周期的计算结果来对比仙游震群序列对波速的影响 (图 8)。

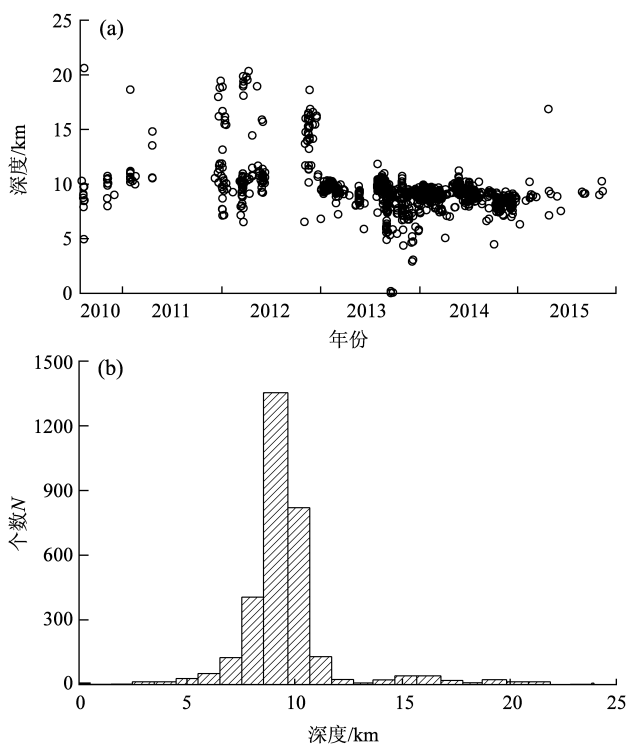


图7 仙游震群序列震源深度时变 (a) 和频度 (b) diagrams of the Xianyou earthquake swarm

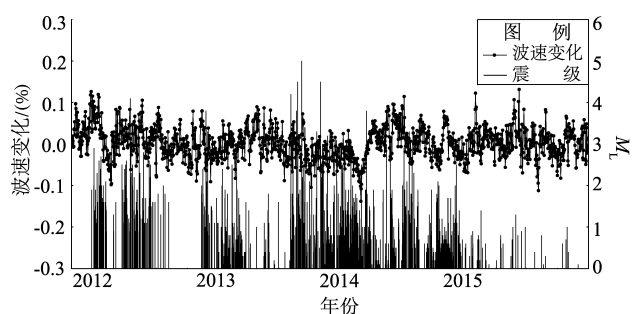


图8 金钟库区 4~8 s 周期地下介质平均相对波速变化与仙游震群序列

Fig. 8 The average relative seismic velocity changes for underground medium in Jinzhong reservoir area in 4~8 s period and the Xianyou earthquake swarm

由图 8 可见, 2011 年 10 月—2013 年 7 月, 波速变化的均值线在 0 值附近。2013 年 8—10 月, 仙游震群地震活动进入最强活跃期, 相继发生了 4 次 $M_L \geq 4.0$ 地震, 其中在仙游震群 $M_L 5.0$ 地震发

生后,波速出现趋势性下降,幅度约为 0.1%,整个下降过程持续半年多(2013 年 9 月—2014 年 3 月),随后波速逐渐恢复,在整个仙游震群活动后期,对介质波速的影响有限。其机制可能是由于多次 $M_L \geq 4.0$ 地震集中发生后,活动断裂及周边地壳介质的应力积累有所释放,从而造成地下介质波速的降低。

3 结论

本文收集福建金钟库区周边 8 个测震台站 4 年多的垂直分量背景噪声资料,提取了库区地下介质波速的相对变化,讨论了水库水位、降雨量以及仙游震群序列对波速变化的影响,得到以下结论:

(1) 研究观测到了与水库蓄水过程相关的波速变化,金钟水库蓄水后,2~4 s 周期内(反映 1~4 km 深度)的计算结果表明在这个深度范围内,波速对水位的变化最为敏感。另外,该周期范围内的波速变化与降雨量呈较好的正相关性,说明该区域地下介质波速变化受上覆岩层压力的影响较大。

(2) 1~2 s 周期范围内(反映地下约数百米~2 km 深度)的波速变化幅度最小,变化也最平稳,与库区水位和降雨量的相关性都不强。分析原因认为,对于 1~2 s 比较高的频带,噪声衰减很快,区域台网平均台间距为 20 km 以上,或许较难获得可靠的波速变化。

(3) 4~8 s 周期范围内(反映 1~10 km 深度)的波速变化与水位变化、降雨量的相关性减弱,说明随着深度的增加,流体的作用较为有限。但在此周期范围内,仙游发生 4 次 $M_L \geq 4.0$ 地震,其中在 2013 年 9 月 4 日仙游震群 $M_L 5.0$ 最大地震发生后,波速变化出现趋势性下降,幅度约为 0.1%,随后逐渐恢复。研究结果中并未观察到明显的单个中强地震引起同震波速降低的情况,这可能是因为地震震级偏低,释放的应力积累不足以引起波速的变化,而多个中强震的群发,可能会对波速变化产生影响。因此研究库区地下浅层介质波速的相对变化,有可能作为水库地震危险性判定的依据。

金钟水库的地震地质基础资料来自福建省地震地质工程勘察院,审稿专家提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 安艳茹,张晓东. 2015. 利用背景噪声研究紫坪铺水库水位加卸载对库区地下介质波速的影响[J]. 中国地震,31(4):616-628.
- 陈翰林,赵翠萍,修济刚,等. 2009. 龙滩水库地震精定位及活动特征研究[J]. 地球物理学报,52(8):2035-2043.
- 陈颢. 2009. 汶川地震是由水库蓄水引起的吗? [J] 中国科学,39(3):257-259.
- 段刚,蔡杏辉,陈惠芳,等. 2017. 福建台网地震目录[EB/OL]. (2017-06-22) [2019-10-18]. <http://www.fjdj.gov.cn/ca/2017011419000006.htm>.
- 胡淑芳,秦双龙,李强,等. 2018. 福建仙游震群的孔隙压扩散特征[J]. 地震学报,40(2):172-183.
- 李强,李军,袁丽文,等. 2015. 福建仙游震群序列 $M_L \geq 4.0$ 事件震源机制与序列活动特征[J]. 地震,35(4):147-156.
- 刘志坤,黄金莉. 2010. 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化[J]. 地球物理学报,53(4):853-863.
- 马文涛,徐长明,李海鹏,等. 2010. 长江三峡水库诱发地震加密观测及地震成因初步分析[J]. 地震地质,32(4):552-563.
- 张致伟,程万正,梁明剑,等. 2012. 四川自贡—隆昌地区注水诱发地震研究[J]. 地球物理学报,55(5):1635-1645.
- 周斌,薛世峰,邓志辉,等. 2010. 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例[J] 地球物理学报,53(11):2651-2670.
- Brenguier F, Shapiro N M, Campillo M, et al. 2008. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise [J]. Nature Geoscience, 1(2):126-130.
- Clarke D, Zaccarelli L, Shapiro N M, et al. 2011. Assessment of resolution and accuracy of the moving window cross spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise[J]. Geophysical Journal International, 186(2):867-882.
- Lecocq T, Caudron C, Brenguier F. 2014. MSNoise, a python package for monitoring seismic velocity changes using ambient seismic noise[J]. Geophysical Research Letters, 41(3):715-726.
- Liu Z K, Huang J L, Peng Z G, et al. 2014. Seismic velocity changes in the epicentral region of the 2008 Wenchuan Earthquake measured from three-component ambient noise correlation techniques [J]. Geophysical Research Letters, 41(1):37-42.
- Ratdomopurbo A, Poupinet G. 1995. Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: Application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia) [J]. Geophysical Research Letters, 22(7):775-778.
- Wang Q Y, Florent B, Michel C, et al. 2017. Seasonal crustal seismic velocity changes throughout Japan [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122:7987-8002.

Crustal Media Seismic Velocity Changes in Jinzhong Reservoir Area in Fujian by Using Ambient Noise

HU Shufang¹, LI Jun¹, DAI Zonghui², LI Qiang¹, LAN Shu¹

(1. *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350000, Fujian, China*)

(2. *Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

Based on continuous seismic data of the stations in Fujian Seismic Network in the surrounding area of the Jinzhong Reservoir during Oct., 2011 and Dec., 2015, we extracted the empirical Green's function between station pairs by using seismic ambient noise correlation methods, and measured the travel-time shifts between the empirical Green's function and the reference Green's function periodically (1 ~ 2 s, 2 ~ 4 s and 4 ~ 8 s), and then calculated the relative seismic velocity changes between the stations in the reservoir area. The results show that the relative seismic velocity changes for underground medium in the 2 ~ 4 s period show the annual variation rule of increases in summer and decreases in winter, which obviously correlated with the change of water level and precipitation in the reservoir area. It shows that the change of water level and precipitation have the greatest influence on the change of seismic velocity in this period. From Aug., 2013 to Oct., 2013, four $M_L \geq 4.0$ earthquakes occurred successively in Xianyou area, among which, after the $M_L 5.0$ earthquake on Sep. 4, 2013, the wave velocity decreased by about 0.1%, and then the wave velocity recovered gradually. At the later stage of the whole earthquake swarm activity, the influence on the seismic velocity of the reservoir medium was not obvious.

Keywords: ambient noise; Jinzhong reservoir area; relative wave velocity change; the water level