

水库诱发地震中水库水体下方的地震波速比^{*}

胡先明, 谢蓉华, 韩进, 孙毅

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 以大桥水库 $M_s 4.6$ 诱发地震和紫坪铺水库 $M_L 2.5$ 诱发震群为例, 研究了穿过水体下方的地震波的波速比在地震前后的变化。由彝海子台记录的穿过大桥水库水体下方的地震波所计算的波速比, 在蓄水后 4.6 级主震前存在高值异常, 反映库水对波速比有影响; 由八角台记录的穿过紫坪铺水库水体下方的地震波所计算的波速比显示, 在 2006 年 8 月 28 日后一时段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 级水库诱发震群。因此认为, 根据穿过水库水体下方的地震波射线计算的单台波速比, 能够反映地震孕育过程中震源及周围地区介质特性的改变, 可作为监测水库地震的一种手段。

关键词: 地震预测; 水库诱发地震; 波速比异常; 四川

中图分类号: P315.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)03-0215-07

0 引言

较大地震前, 由于应力在震源区集中, 使得震源及周围地区地下介质性质发生变化, 从而导致穿过该区域的地震波的传播速度发生变化。因此, 通过研究波速比的变化来预测地震, 是地震分析预报中的一种重要方法。上世纪 70 年代初, 日本、美国及其他国家的研究人员相继发现许多地震前存在波速异常现象。我国在波速比研究中已总结出波速比异常时间、幅度、形态与强震的关系, 也有预报成功的震例。冯德益 (1981) 对地震波速和地震波速比研究有系统总结。据研究, 在丹江口水库宋湾 4.7 级地震的孕育与发生过程中, 波速比大体经历了 4 个阶段, 即低值异常—高值异常—低值异常—回升发震 4 个阶段 (王静瑶, 1984); 新丰江 6.1 级水库诱发地震前, 用水库区域的小台网做的波速比, 主震前呈明显的负异常, 然后又迅速回升到正常水平, 不久即发生 6.1 级主震 (丁原章等, 1989)。邹振轩等 (2006) 用多台和达法计算了 2006 年 2 月 4 日至 4 月 3 日发生在温州珊溪水库地区 $M_L \geq 2.0$ 地震的平均波速比, 观察到在较强地震前有持续的波速比低值异常现象, 在时间分布上有下降—持续异常—回升—发震的明显异常过程。地震波速比异常分析方法和

地震波振幅比等方法有一定映震效果, 在未来三峡水库诱发地震预测中是值得尝试的参考方法 (严尊国等, 2002)。三峡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 (陈俊华等, 2007)。实验表明, 岩石的波速比与静水压的关系分为 4 种类型: ① 随压力增加明显下降; ② 随压力增加缓慢上升; ③ 随压力增加缓慢下降; ④ 随压力增加缓慢波动 (耿乃光等, 1992)。赵晋明等 (2001) 从实验上确证: 岩石在主破裂前一瞬间, 纵波速度升高甚至超过原最大值的两倍以上, 纵、横波波速比升高至 2.5~3.0。

笔者用地震波波速比方法, 对 2002 年 3 月 3 日大桥水库诱发 4.6 级地震和 2007 年 2 月 12 日紫坪铺水库诱发 2.5 级地震震群进行了研究, 观测到了这两个震例前波速比的异常过程, 依据新的震例, 笔者提出了水库诱发地震中波速比研究方法的新思路。

1 基础理论、研究思路及计算公式

1.1 波速变化的研究

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, 变化量约为百分之几至百分

* 收稿日期: 2007-09-11.

基金项目: “十一五” 国家科研计划支撑项目 (2006BAC01B04-02-01) 资助。

之十几。波速比可由下式计算：

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \tag{1}$$

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（傅淑芳等，1980）。

1.2 研究思路

选用 1 个台站进行研究，其记录的 P 和 S 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。同时选用另 1 个台作对比研究，认为该台记录的 P 和 S 波没有穿越库水淹没区，对同一次地震 2 个单台的计算结果进行对比。

蓄水前是饱气带，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，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 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）。蓄水可导致地壳上层（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（陈祖安，2000）。

选择的研究区应当满足：作为研究对象的单台，其记录的 P 和 S 波穿越库水淹没区；作为对比研究的单台，其记录的 P 和 S 波不穿越库水淹没区，计算大桥水库和紫坪铺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。

1.3 单台波速比

设台站处在地震异常区内，由震源到台站的距离为 R，则纵、横波波速比可用下式求得：

$$v = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_p/R}{V_s/R} = \frac{T_s}{T_p} \tag{2}$$

T_s 、 T_p 分别为 S 波和 P 波走时，可表示为： $T_s = t - T_0$ ， $T_p = t_p - T_0$ ，将其代入（2）式简化得

$$v = 1 + \frac{t - t_p}{t_p - T_0} \tag{3}$$

式中 t 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，可从记录图上直接量取 t 、 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，也可以目录中的发震时刻为准（王海涛等，1992）。

1.4 计算方法及公式

大桥水库数据来自《西昌大桥地震观测报告》^①，分别用来计算彝海子台和瓦吉木台的单台波速比。紫坪铺水库数据选自《紫坪铺数字遥测地震台网地震月报目录及观测报告》^②，分别用来计算桂花树台和八角台的单台波速比。一般而言，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。本文的研究重点是提取用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，因用和达法得到的结果异常信息不突出，所以根据波速比的定义，选用公式（3）进行计算。

2 大桥水库水体下方的波速比

大桥水库位于安宁河地震带，是国内处于强震多发地区和高地震烈度区唯一的大（二）型水库，坝高 93 m，库容 $6.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，1999 年 5 月 20 日蓄水。水库遥测地震台网于 1994 年 10 月试运行，1996 年 7 月通过验收。2001 年 9~11 月库区内有密集分布的高频次的近地表小震群活动，以致库区内地震存在 b 值与 η 值等地震学异常（胡先明，2003）。这个小震群震级小、频次高，分布在一个震源深度浅、地域小的空间范围内，小震群为典型的前兆震群（胡先明，2004 a）。2002 年 3 月 3 日 08 时 23 分，大桥水库大坝下游 3 km 处发生 4.6 级地震，震中烈度为 VI 度，冕宁县城震感强烈，大桥水库发电机房预警装置报警，值班人员也感觉到强烈震动，震区民房出现微小裂隙，但地震没有对大桥水库大坝造成影响。笔者根据序列特征、库水位变化与地震的相关性、地震地质构造和震源机制解，判断本次地震为

① 西昌遥测地震台网，大桥水库地震监测中心. 2006 西昌大桥地震观测报告（1996—2006）.
② 四川省地震局水库地震研究所，四川省地震局地震监测研究所. 2007 紫坪铺数字遥测地震台网地震月报目录及观测报告（2004—2007）.
©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

滞后响应的构造型水库诱发地震，属主震 余震型（胡先明，2004 b）。

2.1 选择单台和选取地震

1996 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 31 日，在 28.2°~28.7°N 101.9°~102.5°E 地区，有 319 次 0.0~4.6 级地震可选。选择彝海子台作为水库地震展布区内的研究对象，其记录的地震波都通过库水淹没区。选瓦吉木台的资料作对比，尽量选取相对远离库水淹没区的地震。实际读取 1996 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 31 日间的 0.6~2.8 级地震 79 次（图 1 a），其中：0.6~0.9 级地震 3 次，1.0~1.9 级地震 46 次，2.0~2.8 级地震 30 次。彝海子台记录到 79 次地震，震中距为 2~61 km，平均 26 km，瓦吉木台记录到 26 次地震，震中距为 13~64 km，平均 43 km。

1 b)。大桥水库蓄水前有 18 次地震， v 值在 1.54~1.86 之间， $\bar{v}=1.70$ 比均匀介质状态的理论值 $\sqrt{3}$ 小 0.03。蓄水后至主震发生（1999 年 5 月 20 日至 2002 年 3 月 3 日）有 21 次地震， v 值在 1.65~1.89 之间， $\bar{v}=1.74$ 比理论值大 0.01；主震后有 40 次， v 值在 1.52~1.96 之间， $\bar{v}=1.72$ 比理论值小 0.01。1999 年 5 月 20 日蓄水后有 61 次地震， v 值在 1.52~1.93 之间， $\bar{v}=1.73$ 等于理论值 $\sqrt{3}$ 。

瓦吉木台共记录到 26 次地震，单台波速比 v 值地震在 1.51~1.81 之间， $\bar{v}=1.66$ （图 1 b），比理论值小 0.07。蓄水前有 5 次地震， v 值在 1.65~1.81 之间， $\bar{v}=1.70$ 。蓄水后至主震有 5 次地震， v 值在 1.66~1.74 之间， $\bar{v}=1.69$ ；主震后有 16 次， v 值在 1.51~1.81 之间， $\bar{v}=1.65$ 。

表 1 大桥水库以蓄水事件和主震事件划分
时间段的波速比计算结果

时段	彝海子台记录	彝海子台波	瓦吉木台记录	瓦吉木台波
	地震(次)	速比(\bar{v})	地震(次)	速比(\bar{v})
蓄水前	18	1.70	5	1.70
蓄水至主震	21	1.74	5	1.69
主震后	40	1.72	16	1.65
总体	79	1.72	26	1.66

（2）以异常显示划分时间段

由表 2 可以看出彝海子台和瓦吉木台在 1996 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 31 日间波速比的变化情况。

彝海子台：第 1 时间段（1996 年 1 月 1 日至 2000 年 4 月 10 日）有 21 次地震， v 值在 1.54~1.86 之间， $\bar{v}=1.71$ ，比理论值小 0.02。第 2 时间段（2000 年 4 月 11 日至 2002 年 3 月 3 日）有 19 次地震， v 值在 1.67~1.95 之间， $\bar{v}=1.76$ 比理论值大 0.03。第 3 时间段（2002 年 3 月 4 日至 2006 年 12 月 31 日）有 39 次地震， v 值在 1.52~1.96 之间， $\bar{v}=1.71$ ，比理论值小 0.02。

瓦吉木台：第 1 时间段有 6 次地震， v 值在 1.65~1.73 之间， $\bar{v}=1.69$ 。第 2 时间段有 4 次地震， v 值在 1.66~1.74 之间， $\bar{v}=1.69$ 。第 3 时间段有 16 次地震， v 值在 1.51~1.81 之间， $\bar{v}=1.65$ 。

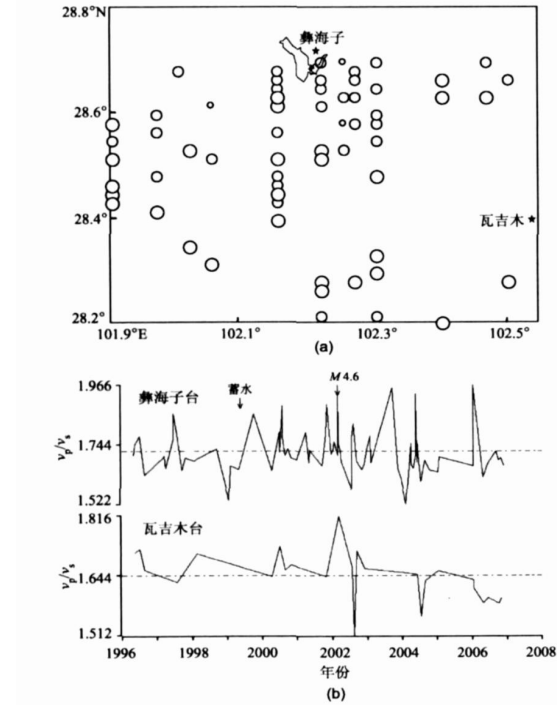


图 1 大桥水库库区地震震中分布（a）和库区波速比计算结果（b）（1996—01—01~2006—12—31）

2.2 波速比的计算结果

（1）以蓄水事件和主震事件划分时间段

由表 1 可以看出，彝海子台记录到的 79 个地震波速比 v 在 1.52~1.96 之间， $\bar{v}=1.72$ （图

表 2 大桥水库以异常显示划分时间段的波速比计算结果

时段	彝海子台记录		瓦吉木台记录	
	地震(次)	速比(%)	地震(次)	速比(%)
第 1 时间段	21	1. 71	6	1. 69
第 2 时间段	19	1. 76	4	1. 69
第 3 时间段	39	1. 71	16	1. 65

(3) 结果对比解释

彝海子台单台波速比平均值 $\bar{v}=1.72$ 比瓦吉木台的 $\bar{v}=1.66$ 高出 0.06 彝海子台的波速比均值更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。在以蓄水和主震事件划分的 3 个时段里, 彝海子台比瓦吉木台的波速比分别高出 0、0.05、0.08 即蓄水前两台 \bar{v} 值是一致的, 蓄水后至主震彝海子台明显高于瓦吉木台, 主震后彝海子台显得更高。在以异常显示划分的 3 个时段中, 彝海子台比瓦吉木台的波速比分别高出 0.02、0.07、0.06 即蓄水前至蓄水初期彝海子台比瓦吉木台高, 蓄水初期至主震前彝海子台比瓦吉木台明显要高, 主震后彝海子台比瓦吉木台明显要高。通过上述对比可以得出: 两台的波速比在蓄水前有差异, 蓄水后至主震差异更突出, 主震后差异变小。

彝海子台在蓄水后至主震间 $\bar{v}=1.74$ 或蓄水初期与主震间 $\bar{v}=1.76$ 的高值现象, 显示彝海子单台记录的穿过水库蓄水区域底下的地震波射线的波速比, 由于受库水影响, 高于当地的波速比平均值, 表明大桥水库蓄水对水体下方岩石的地震波传导性质有影响。

3 紫坪铺水库水体下方波速比

紫坪铺水库位于龙门山断裂带的岷江上游都江堰市麻溪乡, 水库为大 (一) 型工程, 坝高 156 m, 库容 $11.12\times10^8\text{ m}^3$, 2005 年 9 月 30 日蓄水。紫坪铺水库数字遥测地震台网于 2004 年 8 月试运行, 2005 年 6 月通过验收。2004 年 8 月 16 日至 2007 年 2 月 28 日, 在 $30.6^{\circ}\sim31.4^{\circ}\text{N}$ $103.1^{\circ}\sim103.9^{\circ}\text{E}$ 地区, 台网共记录到 $-0.9\sim3.9$ 级地震 1 738 次。2006 年 9 月至 10 月水库快速蓄水后, 于 2007 年 2

月发生了 M2.5 地震群, 笔者认为, 这是与水库快速蓄水有关的水库诱发地震群^①。

3.1 紫坪铺库区东北部地震的波速比

(1) 选择单台和选取地震

2004 年 8 月 16 日至 2007 年 2 月 28 日, 库区东北部 ($31.1^{\circ}\sim31.4^{\circ}\text{N}$ $103.6^{\circ}\sim103.9^{\circ}\text{E}$) 共发生 345 次 0.5~3.6 级地震。八角台在水库地震震群展布区内, 选取地震波通过库水淹没区的记录, 并与相对远离库区的桂花树台的地震波记录作对比。实际读取 2004 年 8 月 16 日至 2007 年 2 月 28 日, 八角台和桂花树台都记录到的 0.6~3.6 级地震 247 次 (图 2 a), 其中, 0.6~0.9 级 32 次, 1.0~1.9 级 171 次, 2.0~2.9 级地震 41 次, 3.0~3.6 级地震 3 次。震中距离八角台 23~63 km, 平均 44 km, 距离桂花树台 4~44 km, 平均 25 km。

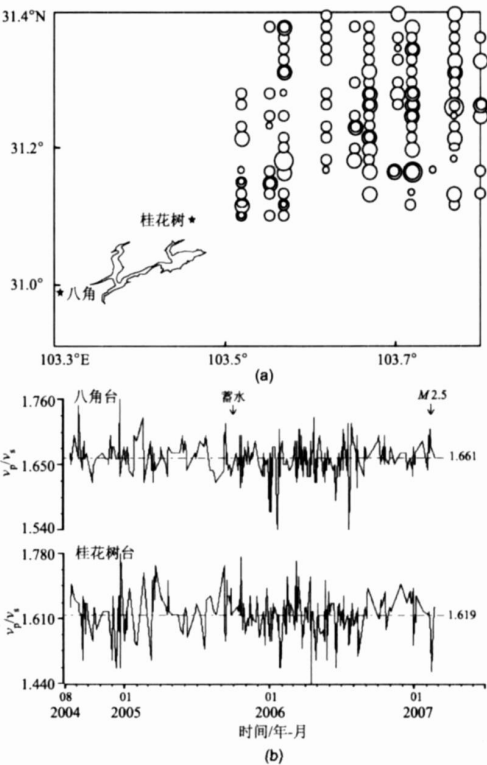


图 2 紫坪铺水库库区东北部地震震中分布 (a) 和波速比计算结果 (b) (2004-08-16~2007-02-28)

表 3 给出了紫坪铺水库库区东北部地震波速比计算结果。

①胡先明, 韩进, 谢蓉华, 等. 2008 紫坪铺蓄水后的水库地震监测预测 [J]. 四川地震, 待刊.
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 紫坪铺水库库区东北部地震波速比计算结果

时段	八角台记录	八角台波	桂花树台记录	桂花树台波
	地震 (次)	速比 (v)	地震 (次)	速比 (v)
蓄水前	86	1.66	86	1.63
蓄水后	161	1.66	161	1.61
总 体	247	1.66	247	1.62

(2) 波速比的计算结果

由八角台资料计算所得的波速比在 1.54 ~ 1.76 之间， $\bar{v}=1.66$ (图 2 b)，比理论值小 0.07。蓄水前 (2005 年 9 月 30 日前) 有 86 次地震，波速比在 1.62 ~ 1.76 之间， $\bar{v}=1.66$ 。蓄水后 (2005 年 9 月 30 日后) 有 161 次地震，波速比在 1.54 ~ 1.73 之间， $\bar{v}=1.66$ 。个别的极值点差异较大，整体上看不出蓄水前与蓄水后波速比的显著变化。相对较为明显的变化是 2006 年 8 月 28 日后，有 38 个地震的 \bar{v} 值有整体变大的情况，该时段波速比 \bar{v} 在 1.63 ~ 1.71 之间， $\bar{v}=1.67$ 。

桂花树台波速比在 1.44 ~ 1.78 之间， $\bar{v}=1.62$ (图 2 b)。蓄水前 (2005 年 9 月 30 日前) 有 86 次地震，波速比在 1.48 ~ 1.78 之间， $\bar{v}=1.63$ 。蓄水后 (2005 年 9 月 30 日后) 有 161 次地震，波速比在 1.44 ~ 1.77 之间， $\bar{v}=1.61$ 。个别的极值点差异较大，整体上看不出蓄水前与蓄水后波速比有明显变化。2006 年 8 月 28 日后有 38 个地震的 \bar{v} 值在 1.47 ~ 1.70 之间， $\bar{v}=1.63$ 。

(3) 八角台与桂花树台的波速比结果比较

八角台单台波速比平均值为 1.66，比桂花树台的平均值 1.62 高 0.04。八角台的波速比平均值更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。蓄水前八角台单台波速比平均值为 1.66，比桂花树台的平均值 1.63 高 0.03。蓄水后八角台单台波速比平均值为 1.66，比桂花树台的平均值 1.61 高 0.05。2006 年 8 月 28 日后的时段内地震的波速比相对较为突出，比八角和桂花树两台的波速比平均值整体高出 0.01。2006 年 10 月至 2007 年 2 月，在八角台附近的汶川水磨发生 2.5 级地震震群。

3.2 紫坪铺水库库区西南部地震的波速比

(1) 以单台记录选取地震

2004 年 8 月 16 日至 2007 年 2 月 28 日，紫坪铺水库库区西南 (30.6° ~ 30.95° N, 103.1° ~

103.45° E) 有 240 次 0.5 ~ 3.9 级地震可选。实际选取 2004 年 8 月 16 日至 2007 年 2 月 28 日，桂花树和八角台都记录到的 0.5 ~ 3.9 级地震 131 次 (图 3 a)，其中，0.6 ~ 0.9 级地震 30 次，1.0 ~ 1.9 级地震 82 次，2.0 ~ 2.9 级地震 16 次，3.0 ~ 3.9 级地震 3 次。震中距离桂花树台 20 ~ 70 km，平均为 40 km；距离八角台 3 ~ 51 km，平均为 22 km。计算结果见表 4。

表 4 紫坪铺水库库区西南部地震波速比计算结果

时段	桂花树台记录	桂花树台波	八角台记录	八角台波
	地震 (次)	速比 (v)	地震 (次)	速比 (v)
蓄水前	39	1.67	39	1.64
蓄水后	92	1.67	92	1.64
总 体	131	1.67	131	1.64

(2) 波速比的计算结果

桂花树台波速比值在 1.59 ~ 1.80 之间， $\bar{v}=1.67$ (图 3 b)，比理论值小 0.06。蓄水前 (2005 年 9 月 30 日前) 有 39 次地震，波速比在 1.59 ~ 1.75 之间， $\bar{v}=1.67$ ；蓄水后 (2005 年 9 月 30 日后) 有 92 次地震，波速比在 1.59 ~ 1.80 之间， $\bar{v}=1.67$ 。虽然个别的极值点与平均值差异较大，但整体上看不出蓄水前与蓄水后波速比有明显变化。

八角台波速比在 1.46 ~ 1.86 之间， $\bar{v}=1.64$ (图 3 b)，比理论值小 0.09。蓄水前 (2005 年 9 月 30 日前) 有 39 次地震，波速比在 1.46 ~ 1.72 之间， $\bar{v}=1.64$ ；蓄水后 (2005 年 9 月 30 日后) 有 92 次地震，波速比在 1.50 ~ 1.86 之间， $\bar{v}=1.64$ 。虽然个别的极值点与平均值差异较大，但整体上看不出蓄水前后波速比有明显变化。

(3) 桂花树台与八角台的单台波速比计算结果比较

桂花树台单台波速比平均值为 1.67，比八角台的 $\bar{v}=1.64$ 高 0.03。桂花树台更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。桂花树台与八角台的单台波速比在时序上看不出差异。

上述对紫坪铺水库的研究，是以桂花树台和八角台的记录资料作为研究对象和比对目标，对库区东北部 247 次地震和库区西南部 131 次地震穿

过蓄水区域底部的地震波射线，计算出其单台波速比。八角台的计算结果显示，在 2006 年 8 月 28 日后这个时段内，库区东北部地震波速比有微小高值异常，比库区整体波速比平均值高 0.01。

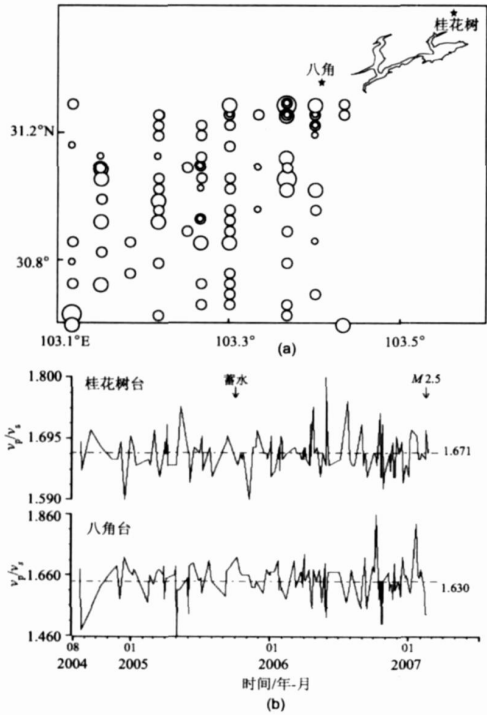


图 3 紫坪铺水库库区西南部地震震中分布 (a) 和波速比计算结果 (b) (2004—08—16~2007—02—28)

4 讨论与结论

(1) 大桥水库库区选取的 79 次做波速比的地震距离彝海子台 2~61 km，平均 26 km，距离瓦吉木台 13~64 km，平均 43 km。彝海子台记录的通过水体下方的地震波波速比平均值为 1.72，比瓦吉木台的波速比平均值 1.66 高 0.06。彝海子台的波速比平均值更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。所选紫坪铺水库库区东北部做波速比的 247 次地震，距离八角台 23~63 km，平均 44 km，距离桂花树台 4~44 km，平均 25 km。用八角台记录计算得到的通过水库水体下方的地震波波速比平均值为 1.66，比桂花树台的 1.62 高 0.04。因此，八角台的波速比平均值更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。所选紫坪铺水库库区西南部做波

速比的 131 次地震，距离桂花树台 20~70 km，平均 40 km，距离八角台 3~51 km，平均 22 km。桂花树台记录到的通过水体下方的地震波波速比平均值为 1.67，比八角台的 1.64 高 0.03。桂花树台的波速比平均值更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。

由上述可见，由彝海子、八角和桂花树 3 个台的单台记录计算所得的水库水体下方波速比平均值均高于与其作为对比的瓦吉木台、桂花树台和八角台，同时彝海子台的单台波速比平均值更接近理论值 $\sqrt{3}$ 。在做波速比研究时应当考虑震中距对波速比的影响，本文选取的地震的震中距都小于 70 km，地震分布相对集中在本文所选取计算的地震范围中，震中距不可能影响到波速比。

(2) 波速异常的一般形态是在地震前为负值异常（梅世蓉等，1993），而本研究所得结果为正值异常，与以前的波速异常的一般形态不同。耿乃光等（1992）的实验表明岩石的波速比与静水压的关系有四种类型；赵晋明等（2001）从实验上证明岩石在主破裂前一瞬间波速比升高甚至达 2.5~3.0。笔者认为波速异常可能有不止一种形态，有可能存在正值异常。

用穿过水库蓄水区域下方的地震波射线所做的单台波速比，能够反映地震孕育过程中震源及周围地区的介质特性发生的改变，因而可以作为水库地震的监测手段。大桥水库 4.6 级主震前单台波速比的高值过程，反映水库蓄水对水体下方的岩石传导地震波有影响。2006 年 8 月 28 日后这一时段，八角台的记录反映紫坪铺水库库区东北部的地震在八角台有微小高值异常，该异常对应了 2006 年 10 月至 2007 年 2 月期间在八角台附近的汶川水磨发生的 2.5 级水库诱发地震震群。

参考文献:

陈俊华, 甘家思, 李普丽, 等. 2007. 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, 27 (专刊): 12-14.

陈祖安主编. 2000. 中国水力发电工程 (工程地质卷) [M]. 北京: 中国电力出版社.

丁原章. 1989. 水库诱发地震 [M]. 北京: 地震出版社.

冯德益. 1981. 地震波速异常 [M]. 北京: 地震出版社.

- 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.
- 胡先明. 2003 大桥水库诱发 4.4 级水库地震前的地震学异常 [J]. 地震地磁观测与研究, 24 (3): 14—19.
- 胡先明. 2004^a 大桥水库诱发地震前的小震群. 四川地震, (2): 36—41.
- 胡先明. 2004^b 冕宁大桥水库诱发地震研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 24 (2): 88—91.
- 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.
- 王静瑶. 1984 丹江口水库蓄水后的波速比异常 [M] // 国家地震局地震研究所. 中国诱发地震. 北京: 地震出版社. 78—84.
- 严尊国, 杨福平, 周昕, 等. 2002 未来长江三峡水库诱发地震的预测技术探讨 [J]. 大地测量与地球动力学, 22 (1): 101—109.
- 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.
- 赵晋明, 胡毅力, 杨润海, 等. 2001 岩石临破坏前波速奇异变化的再研究 [J]. 地震研究, 24 (2): 136—139.

Seismic Wave Velocity Ratio under Water Body of Reservoir during Reservoir-induced Earthquakes

HU Xianming, XIE Rong-hua, HAN Jin, SUN Yi

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

Abstract

Taking the Daqiao reservoir induced earthquake ($M_s 4.6$) and Zipingpu reservoir induced earthquake swarm (the maximum $M_L 2.5$) for example, we studied the change of seismic wave velocity ratio before and after the earthquakes using the data of seismic ray that passed through the medium under water body. Based on the Yihajizi station's records (the seismic ray passed through the medium under the water body of the Daqiao reservoir), the velocity ratio showed high-value anomaly after the reservoir impounding and before the earthquake occurring, which reflects the influence of impounding on velocity ratio. Based on the Bajiao station's records (the seismic ray passed through the medium under the water body of the Zipingpu reservoir), the velocity ratio also showed high-value anomaly during a period of time after Aug. 28, 2006, and an $M_L 2.5$ earthquake swarm occurred about the Bajiao station in the following months. So, the wave velocity ratio computed by using the data of seismic ray that passed through the medium under the water body of reservoir can reflect the change of the medium characteristics in and around an epicenter during a seismogenic process, and can be as a way to reservoir induced earthquake prediction.

Key words: earthquake prediction; reservoir induced earthquake; v_p/v_s ratio anomaly; Sichuan



温瑞智 中国地震局工程力学研究所信息技术与工程材料室主任、研究员,中国地震局新世纪百人计划人选。1994年毕业于大连理工大学工程力学系,获硕士学位。1999年毕业于中国地震局工程力学研究所,获博士学位,随即入哈尔滨工业大学力学博士后流动站和北京工业大学土木工程博士后流动站工作。中国地震学会会员、中国地理信息系统协会会员、加拿大土木工程协会会员、加拿大地震工程协会会员。主要从事强震动观测、断层对地震动影响、信息技术在防灾减灾领域中的应用等研究。



潘纪顺 中国地震局地球物理勘探中心高级工程师。2002年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理学专业,获理学硕士学位。2007年毕业于中国地震局地球物理研究所固体地球物理学专业,获理学博士学位。主要从事浅层地震勘探、地震宽角折射、反射勘探、高分辨率折射地震勘探、火山监测、桩基检测等工作,主要研究方向是地震数据处理、地震成像与反演。



杜方 四川省地震局研究员。1992年毕业于武汉测绘科技大学,获硕士学位。主要从事现今地壳运动及动力学、前兆机理与地震预测方法等研究。



刘勇健 广东工业大学副教授。1993年毕业于成都理工学院油气地质与勘探专业,获工学硕士学位。现在中国科学院广州地球化学研究所地质构造专业攻读博士学位。主要从事岩土工程的教学与研究工作。



刘琼仙 云南省地震局高级工程师。1988年毕业于江苏工学院计算机及应用专业,获工学学士学位。主要从事强震动观测网络及信息的研究工作。



耿杰 山东省地震局副局长。1985年毕业于山东科技大学地质系。主要从事地震分析预报与研究工作。



胡先明 四川省地震局高级工程师。1981年毕业于国家地震局天水地震学校地球物理专业,1988年毕业于中国科学技术大学地球物理专业。主要从事水库诱发地震研究和地下水观测等工作。



王爱国 中国地震局地震预测研究所兰州基地副研究员。1994年毕业于兰州大学地质系,2002年获中国地震局兰州地震研究所硕士学位。主要从事地震地质、工程地震及数值模拟等方面的研究工作。