

卢显、张晓东、周龙泉等 2013, 紫坪铺水库区域地震波速比计算及研究, 中国地震 29(2) 236~245。

# 紫坪铺水库区域地震波速比计算及研究

卢显 张晓东 周龙泉 杨志高

中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

**摘要** 利用多台和达法计算紫坪铺水库区域地震波速比, 结果显示, 紫坪铺水库西南区绝大多数的波速比值为 1.6~1.8, 平均值为 1.74, 波速比随时间的变化与地震的发生表现为正常-降低-发震的关系。水库西南区发震概率与水库蓄水相关性最为明显, 该区域在蓄水高峰期都有地震增多的现象, 且较大地震几乎均发生在水库卸载阶段, 在此时段内的波速比值下降。水库西南区的平均波速比高于水库东北区的平均波速比, 初步判断这与水库西南区的断裂构造分布及地下介质性质有关。

**关键词:** 紫坪铺水库 波速比 地下介质

[文章编号] 1001-4683(2013)02-0236-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

在对波速异常与较大地震的关系研究中, 日本地震学家首先发现并研究了大地震前地震波速度的变化(冯德益, 1981); 苏联学者提出地震前波速比异常变化的全过程: 震前波速比一般先下降, 然后回升, 当再次达到或略超过初始值后就发生主震, 震后还有一个不稳定的变化区(谢苗诺夫, 1969); 我国地震工作者从 20 世纪 70 年代开始也进行了大量的波速异常研究(岳晓媛等, 2008; 陈俊华等, 2007; 黎明晓等, 2004)。

紫坪铺水库于 2005 年 9 月 30 日蓄水, 位于龙门山构造带的中南端, 龙门山构造带 3 条主干大断裂自东向西是前山灌县-江油断裂、中央北川-映秀断裂和后山汶川-茂汶断裂。库区主要分布在中央北川-映秀断裂和前山灌县-江油断裂之间(卢显等, 2010)。通过研究紫坪铺水库区域的波速比变化, 可以得出该区域波速比异常与水库水位、渗流以及水库区域地震之间的关系, 为进一步分析紫坪铺水库区域地震的类型特征提供丰富的资料。2008 年 5 月 12 日的汶川 8 级大地震的微观震中(103.4°E, 31.0°N) 离库区最近距离只有约 6km, 所以研究大震前该区域的波速比异常对今后通过波速异常进行地震预测研究有重要意义。

## 1 研究区背景

### 1.1 库区地质背景

紫坪铺水库区域主要有 3 个地震密集区(图 1), 在不同区域地震活动有不同的特点, 故本文将对 3 个地震密集区分别进行讨论。通过 3 个地震密集区地下水类型得知库区西南地

[收稿日期] 2012-10-22; [修定日期] 2013-05-02。

[项目类别] 科技部水库地震空间演化(2008BAC38B03-02) 和公益性行业科研专项(200808036) 资助。

[作者简介] 卢显, 女, 1985 年生, 硕士, 主要从事数字地震研究。Email: luxian@irsa.ac.cn

震密集区域的主要岩性为碳酸盐岩, 库区东北地震密集区主要岩性为碎屑岩和部分碳酸盐岩, 前山断裂密集区主要为冲积、洪积层和冰水堆积物。由于碳酸盐岩质地坚脆, 脆性较强, 有利于应力的集中, 因而相应的岩体中断裂、节理比较发育, 从而具有较好的渗透性, 有利于库水的渗透, 故较易发生水库地震, 这较好地解释了紫坪铺水库西南区地震与水库水位变化具有相关性的现象。

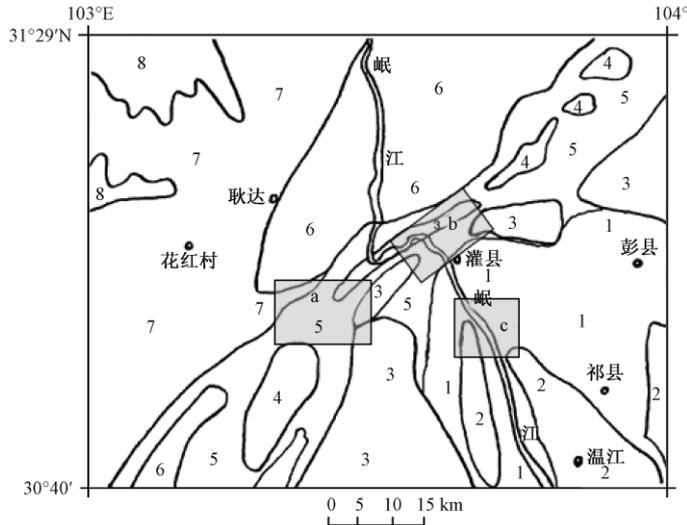


图1 紫坪铺水库地下水类型(王云基 2001)

图中阴影区域为紫坪铺水库区地震密集区(a 西南区 b 东北区 c 前山断裂区)

1. 冲积、洪积层孔隙潜水段; 2. 冰水堆积层孔隙潜水段; 3. 碎屑岩(红层)裂隙孔隙水段; 4. 碳酸盐岩裂隙溶水段; 5. 碳酸盐岩夹碎屑岩溶隙裂隙水及碎屑岩裂隙间水段; 6. 岩浆岩裂隙水段; 7. 变质岩裂隙水段; 8. 冰缘融冻裂隙水段

## 1.2 库区地震活动

紫坪铺水利枢纽工程水库诱发地震监测预测系统是由四川省地震局水库地震研究所负责设计建设的, 其中水库数字遥测台网的7个遥测子台分别为灵岩寺、钻洞子、白岩、八角、桂花树、桃子坪、庙子坪等台, 还有一个四川省遥测地震台网中的油榨坪台(图2)。

运用双差定位法对紫坪铺水库区地震进行精确定位(卢显等 2010), 精定位后的地震主要集中分布在龙门山推覆构造带的中央北川-映秀断裂、前山灌县-江油断裂和后山汶川-茂汶断裂, 绝大部分地震位于北川-映秀断裂并收敛于紫坪铺水库的两端。小震活动在空间分布上具有明显成带性, 分布的优势方向为NE向, 与龙门山地震带走向一致。较密集的小震丛有3个, 其中2个沿着北川-映秀断裂分别位于水库的北东向和西南向, 第3个为垂直于灌县-江油断裂, 走向NW的小震密集带(图2)。

紫坪铺水库于2005年9月30日开始蓄水, 并且在2006年9~10月和2007年9~12月出现两次蓄水高峰期。水库西南地震密集区受水库蓄水影响最为明显(图3), 水库蓄水后, 该区域地震明显增多且与水库水位变化有着较好的对应关系, 在之后的两个蓄水高峰阶段也出现地震增多的现象; 前面提及该区域地下岩性主要为碳酸盐岩类, 故水库蓄水后库水易渗透易引发地震活动, 且水位上升以后的两个月左右是地震的发生阶段。相反, 水库东北区

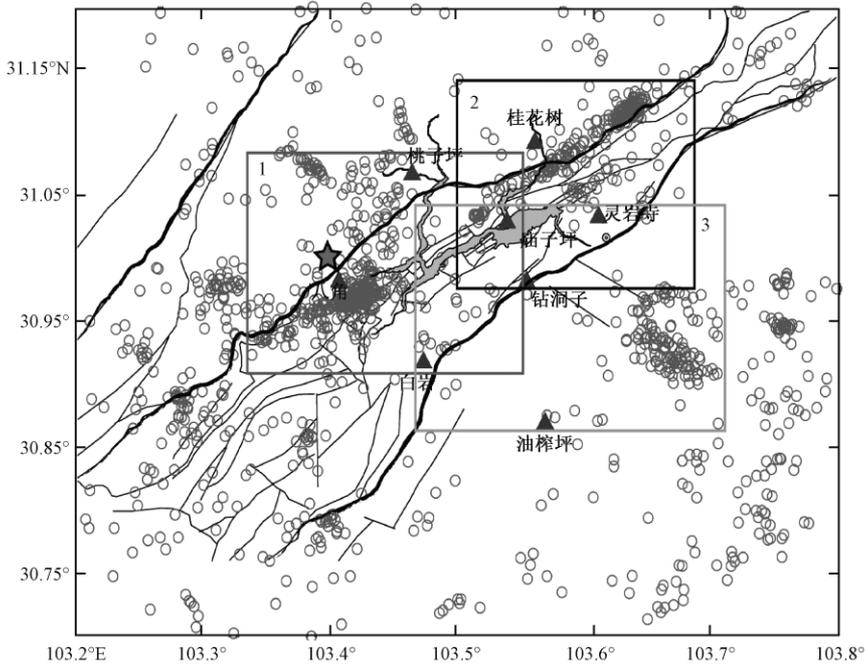


图2 精定位后地震分布

1. 水库西南区; 2. 水库东北区; 3. 前山断裂区; ▲. 地震台站

地震活动在蓄水之后竟然有所下降, 而前山断裂区地震活动几乎不受水库蓄水的影响。

## 2 波速研究方法及数据处理

本研究采用多台和达法计算波速比(冯德益, 1981), 这是以和达法为基础, 利用震中周围多台记录的纵、横波到时计算平均波速比的方法。对某个地震事件把一组台站记录的纵波到时  $T_{P_i}$  和纵横波到时差  $T_{(S-P)_i}$  进行拟合, 求取该拟合直线的斜率, 此斜率加 1 即得波速比  $r$

$$r = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta T_i T_{P_i}) - \sum_{i=1}^n T_{P_i} \sum_{i=1}^n \Delta T_i} \quad (1)$$

式中  $T_{P_i}$ 、 $T_{S_i}$  为多台记录到的近震直达 P、S 波到时,  $n$  为台站个数,  $R$  为相关系数,  $\Delta T_i = T_{S_i} - T_{P_i}$ 。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{P_i} - \bar{T}_P) (\Delta T_i - \Delta \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{P_i} - \bar{T}_P)^2 - \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta \bar{T})^2}} \quad (2)$$

式中  $\bar{T}_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{P_i}$ ,  $\Delta \bar{T}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ , 可求得波速比剩余标准差  $S$ 。

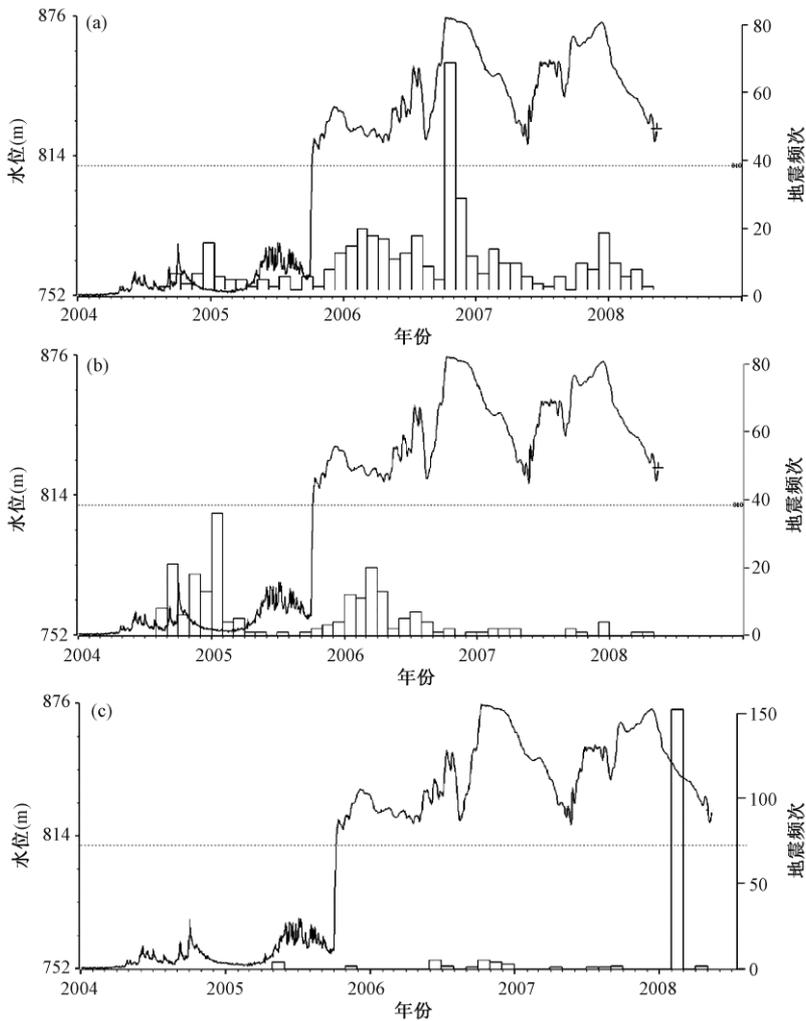


图3 紫坪铺水库水位及研究分区地震频次(曲线为水位线,方柱为地震频次)

(a) 水库西南区; (b) 水库东北区; (c) 前山断裂区

$$S = \sqrt{\frac{(1-R)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta \bar{T})^2}{n-2}} \quad (3)$$

波速比主要反映的是地壳上层介质泊松比的变化,在所选定的区域,且台站相对固定的条件下,由于地震波受所经路径的影响,波速比的变化在一定程度上反映了地下介质的变化,故分析波速比的变化,可以探讨研究区地下介质与地震的关系。

### 3 波速比计算

#### 3.1 数据选取

计算地震波速比的难点在于对震相的判定,影响波速比计算精度的主要因素是:直达 P

波和 S 波的到时判读精度、参与拟合的台站个数、地震定位精度等(王林瑛等 2008)。为了提高波速比计算精度,首先利用紫坪铺水库区域 8 个台站 2004 年 8 月 16 日至 2008 年 5 月 10 日记录的地震数据进行双差定位,共得到紫坪铺水库区域 1340 个地震的精定位结果(卢显等 2010)。精定位的到时残差均方根平均值为 0.048s,震源位置的估算误差在水平方向上平均为 0.63km,在垂直方向上平均为 0.51km,保证了研究数据的精确性。

① 选择水库西南区、东北区和前山断裂区 3 个地震丛发区作为研究区域,既能尽量减少地震波传播路径的差异,又能保证一定数量的研究样本。

② 选取单个地震事件  $T_s - T_p \leq 25s$  的台站的震相记录进行计算,将地震波射线经过区域限制在一定范围内。

③ 采用至少有 4 个及 4 个以上台站清楚记录到 P 波和 S 波到时的单个地震事件(一律采用  $P_g$  和  $S_g$  震相数据),且拟合相关系数  $R \geq 0.95$  的数据。所有地震事件的震源深度在 30km 以内。

据上述 3 点进行计算,结果表明水库西南区和东北区结果较为理想,前山断裂区由于数据有限,故结果仅作参考。

### 3.2 误差分析

若波速比的剩余标准差  $S < 1.0$ ,证明  $V_p/V_s$  的误差相对较小(赵明淳等 2005)。水库西南区域地震波速比的平均剩余标准差  $\bar{S} = 0.15$ ,水库东北区  $\bar{S} = 0.18$ ,证明计算结果可靠(图 4)。

### 3.3 波速比计算结果

按照前文设定条件,对紫坪铺水库区域(表 1)进行波速比变化分析研究,得出不同区域的波速比变化结果。

紫坪铺大区域的范围为  $30.70^\circ \sim 31.20^\circ N$ 、 $103.20^\circ \sim 103.80^\circ E$ ,该区域包

表 1 地震研究区范围

研究分区	纬度(N)	经度(E)
水库西南区	$30.91^\circ \sim 31.07^\circ$	$103.33^\circ \sim 103.54^\circ$
水库东北区	$30.98^\circ \sim 31.15^\circ$	$103.50^\circ \sim 103.69^\circ$
前山断裂区	$30.86^\circ \sim 31.03^\circ$	$103.47^\circ \sim 103.72^\circ$

含所有的 1340 个地震的精定位结果。从图 5 看出整个区域的平均波速比值为 1.74,2006 年 11 月左右波速比值开始下降,一直保持低值状态至 2007 年 3 月底开始回升,当年 5 月份恢复到平均值水平,2008 年 2 月份整个区域的波速比值急速上升。经研究发现,2008 年 2 月份波速比值的急速上升是由于当时发生了都江堰小震群。同时,为了对比分析精定位对波速比的影响,本文还利用据原始地震目录进行波速比计算(图 5)。结果表明,据精定位目录计算的波速比变化与据原始目录计算的波速比变化基本一致,但据精定位目录的计算误差略小,基于优化数据的考虑,本文后续计算数据仍采用精定位地震目录。

紫坪铺水库库区位于  $30.70^\circ \sim 31.20^\circ N$ 、 $103.20^\circ \sim 103.80^\circ E$ ,该区域包括中央断裂带两个地震密集区,不包含位于前山断裂的地震密集区。该区域的平均波速比为 1.74,变化趋势也与整个区域的变化趋势基本一致,都是从 2006 年 11 月开始下降,保持低值状态至 2007 年 3 月底开始回升,当年 5 月份恢复到平均值水平。

图 7 与图 8 分别给出了水库西南区和东北区的地震射线的分布,射线覆盖区域即为波速变化主要反映的区域。

图 9 显示,水库西南区满足要求的数据共 325 个,其绝大多数波速比值为 1.6 ~ 1.8,平

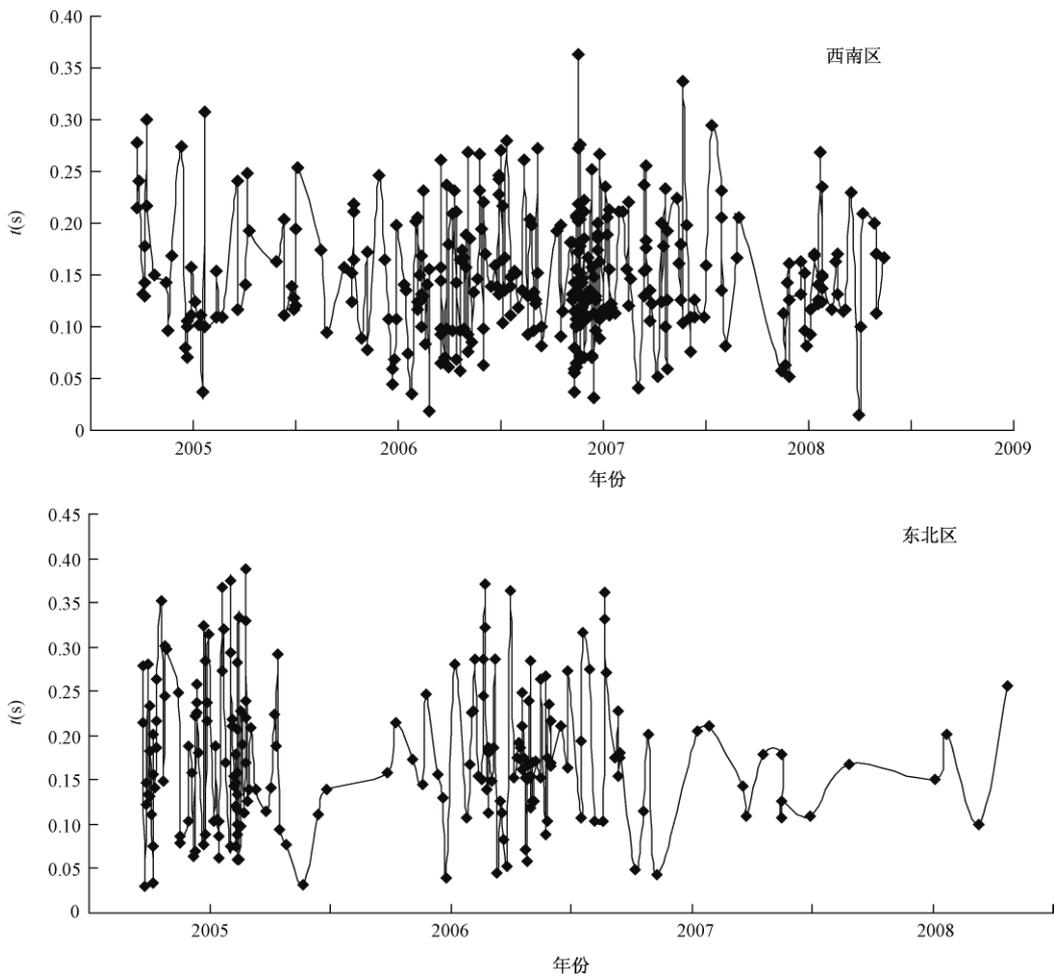


图4 水库西南区与东北区  $V_p/V_s$  的标准偏差  $S$  曲线图

均为 1.74, 波速比平滑曲线更直观地反映了波速比的变化趋势。2006 年 11 月水库西南区波速比明显下降, 之后该区域的波速比一直较低, 2007 年 5 月份回升到均值水平, 但是直至 2008 年 5 月份才恢复到下降前的 2006 年 11 月份的水平, 当年 5 月 12 日发生汶川大地震。汶川大地震前, 在 1 年半的时间里, 水库西南区的波速比表现出正常-降低-发震的变化过程。同时, 从 2004 年 12 月到 2008 年 5 月水库西南区共发生 12 次 2 级以上地震, 这些地震均发生在水库卸载阶段同时伴有波速比的下降, 其中只有 2007 年 6 月和 11 月两次  $M_s 2.1$  地震发生在水库加载阶段。地震频次与水库水位相关性显著, 但从图 9 与图 10 分析, 波速比与水库水位变化似乎并非明显相关。

水库东北区满足要求的地震事件共 200 个, 波速比均值为 1.71。由于水库东北区满足条件的地震数据较少, 故该区域波速比数据较少, 且变化幅度小, 受水库蓄水影响不大, 但从东北区域波速比平滑曲线来看, 该区域波速比自 2006 年 5 月份开始下降, 且至 2008 年 5 月一直低于平均水平。研究时间内, 此区域共发生 3 次 2 级以上地震, 同样都发生在水库卸载

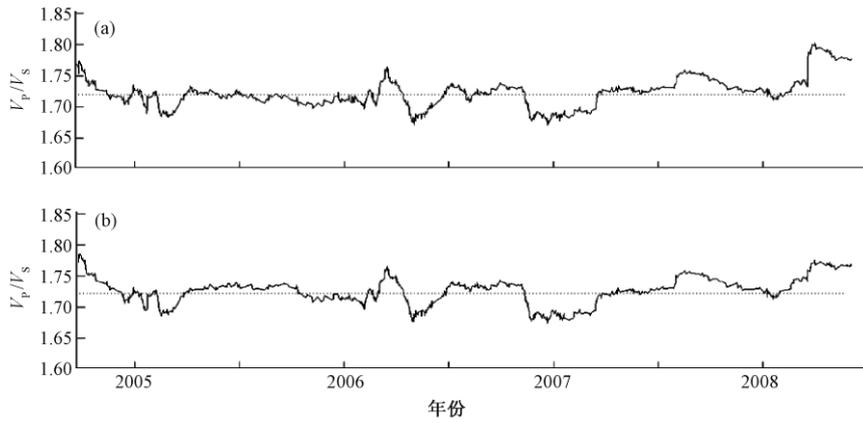


图5 大区域波速比曲线

(a) 据原始目录计算的波速比曲线; (b) 据精定位目录计算的波速比曲线



图6 水库区域波速比曲线

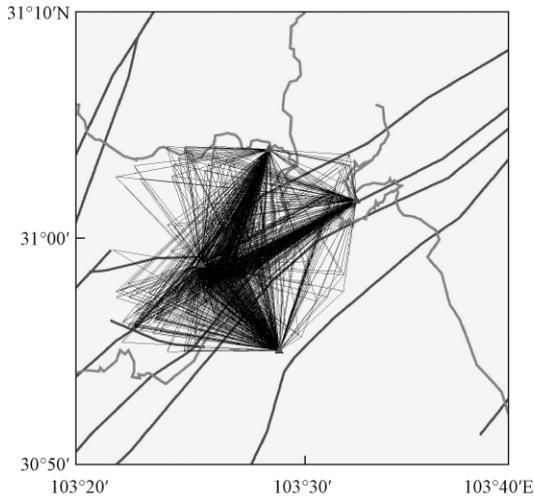


图7 水库西南区地震与记录台站间的射线空间覆盖区

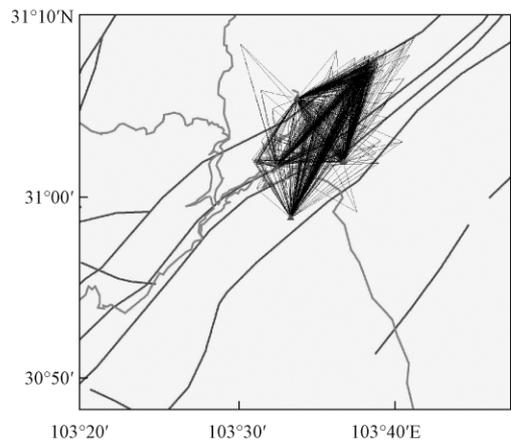


图8 水库东北区地震与记录台站间的射线空间覆盖区

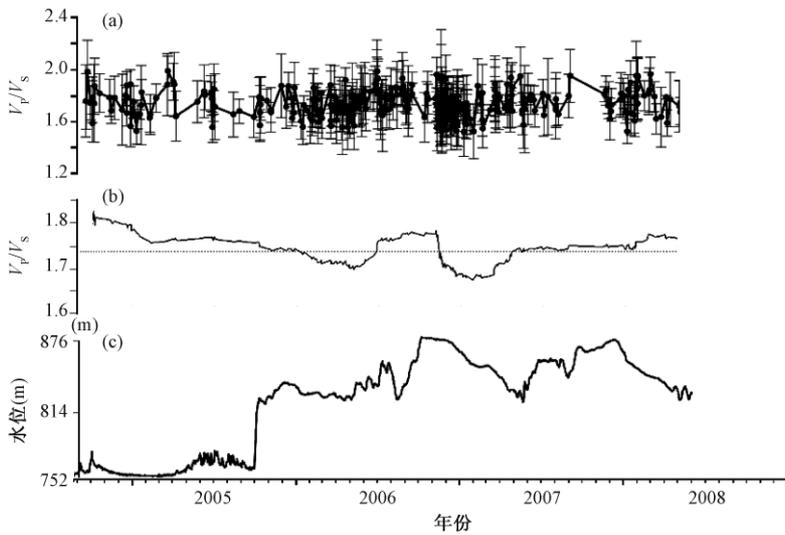


图9 水库西南区波速比与水库水位变化曲线

(a) 波速比变化曲线及误差棒; (b) 10次地震事件的波速比滑动平均值; (c) 水库水位曲线

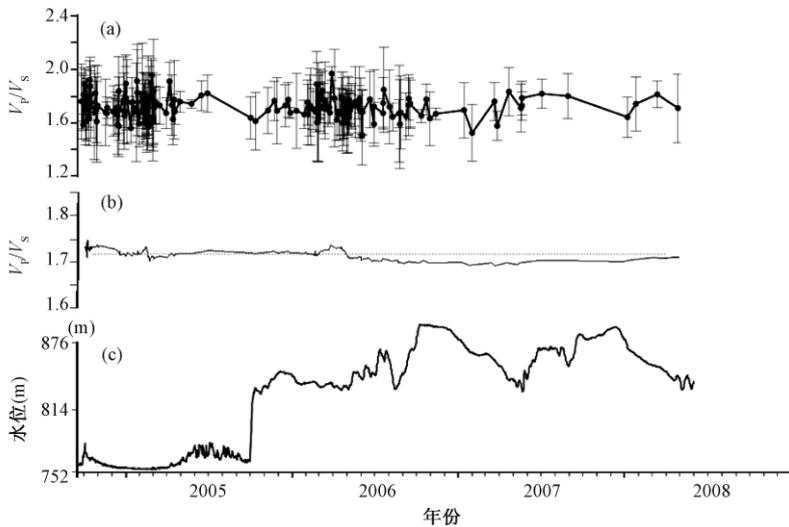


图10 水库东北区波速比与水库水位变化曲线

(a) 波速比变化曲线及误差棒; (b) 10次地震事件的波速比滑动平均值; (c) 水库水位曲线

阶段。

前山断裂区在水库蓄水前后地震较少,虽然2008年2月份突发都江堰小震群,但其符合波速比计算条件的数据较少,缺少参考性,故未做相关分析。

#### 4 结论

2004年8月~2008年5月,紫坪铺水库区域的地震主要集中在水库的西南、东北和前

山断裂 3 个区域,通过 3 个地震密集区地下水类型得知库区西南地震密集区域的主要岩性为碳酸盐岩,水库蓄水对该区域的影响最为明显。东北地震密集区的岩性主要为碎屑岩和部分碳酸盐岩,前山断裂密集区主要为冲积、洪积层和冰水堆积物。水库东北区地震活动在水库蓄水之后有所下降,而前山断裂区的地震活动主要表现为 2008 年 2 月份的都江堰小震群,该区域几乎不受水库蓄水的影响。

采用多台和达法计算了各地震密集分区的波速比变化。在汶川大地震前 1 年半的时间里,水库西南区的波速比表现出正常-降低-发震的变化过程,且 2 级以上地震几乎均发生在水库卸载阶段同时对应波速比下降。水库东北区波速比自 2006 年 5 月份~2008 年 5 月份一直低于平均水平,且此区域发生的 3 次 2 级以上地震也都处于水库卸载阶段。同时,水库西南区域地震波速比计算结果的平均剩余标准差为 0.15,水库东北区地震波速比计算结果的平均剩余标准差为 0.18,证明计算结果可靠。

计算结果表明:

(1) 水库西南区波速比自 2006 年 11 月份开始下降,至 2008 年 5 月初恢复到下降前水平,表现为正常-降低-发震的变化过程。根据岩石样品破裂实验结果,在岩石受压初期,波速比却随压力的增大而增大。但在岩石破裂前,当压力超过岩石强度的 50% 左右以后,波速比却随压力的增大而明显下降。这种现象的一般解释是由于介质结构发生变化并出现微破裂所致,随之伴有体积膨胀(或称“扩容”)现象(冯德益,1981)。对岩石破裂后的变化,有的研究者认为是由于地下水的渗入,水肿作用提高了孔压力,岩石弹性模量增大,波速比又回升,由于水渗流很慢,波速需要一定时间才能恢复正常,达到发震阶段(李善邦等,1981)。

(2) 水库西南区的平均波速比明显高于水库东北区的平均波速比,初步判断其与水库西南区的断裂构造分布及地下介质性质有关。水库西南区的地下岩性主要为碳酸盐岩,随着水库库区蓄水,地下岩性的孔隙水压增大,岩体渗水软化,介质微裂隙充分发育,因而该区的波速比值较高。陈俊华等(2011)也曾提出波速比与不同地层岩石的透水性成正比的结论。另外,碳酸盐岩的主要化学成分有 CaO、MgO 及 CO<sub>2</sub>,其氧化物主要有 SiO<sub>2</sub> 等,有研究表明(Zhao et al, 1992),高波速比可能反映局部熔融的岩浆囊,含流体和裂隙。波速比的变化主要是由于 SiO<sub>2</sub> 含量的变化所引起(Christansen, 1996),较多铁镁质的地壳对应着较高的波速比,这也从一定程度上解释了水库西南区波速比变化的现象。并且由于地下岩性的缘故,水库西南区发震概率与水库蓄水相关性最为明显,该区域在蓄水高峰期皆出现了地震增多的现象。

## 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,大地测量与地球动力学 27(专辑),12~14。
- 陈俊华、甘家思、魏贵春等 2011,水库断层岩溶带地震波波速比研究,人民长江 42(3),23~26。
- 冯德益,1981,地震波速异常,北京:地震出版社,11~22。
- 黎明晓、张晓东 2004,应用多台法测定华北地区地壳的平均波速比,地震 24(1),163~169。
- 李善邦,1981,中国地震,北京:地震出版社。
- 卢显、张晓东、周龙泉等 2010,紫坪铺水库库区地震精确定位研究及分析,地震 30(2),10~19。
- 王林瑛、郭永霞、刘芳等 2008,文安地震前后首都圈分区波速比时变特征,地震学报 30(3),240~253。

- 王云基 2001 四川紫坪铺水库区水文地质与工程地质条件研究, 四川地震 99(2) 6~13。
- 岳晓媛、王林瑛、武安绪 2008 北京地区地震波速比异常变化与首都圈中等地震的关系研究, 地震地磁观测与研究 29(3) 10~13。
- 赵明淳、刁桂苓、张学民 2005 首都圈平均波速比分析, 西北地震报 27(3) 246~254。
- Christansen N I, 1996, Poisson's ratio and crustal seismology, J Geophys Res, 101, 3139~3156.
- Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S, 1992, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J Geophys Res, 97(B13), 19909~19928.
- Семенов, 1969, Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сплывными землетрясениями. Изп. АН СС-СР. Физика Земли. 4.

## Calculation and research on $V_P/V_S$ ratio in the Zipingpu reservoir area

Lu Xian Zhang Xiaodong Zhou Longquan Yang Zhigao

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** According to the multi-station method and using digital seismic records in the Zipingpu reservoir, we studied the seismic velocity ratio. The result shows that the wave velocity ratios in the southwest area of Zipingpu reservoir are most between 1.6 and 1.8, and its average seismic wave velocity ratio is 1.74. The wave-velocity ratio formed a pattern of normality, fall and earthquake occurrence. The probability of earthquake in the southwest area of reservoir affected by reservoir impounding was most pronounced, and there were more earthquakes in the water peak. Larger earthquakes in the southwest area of Zipingpu reservoir are corresponding to the unloading process in the reservoir and the falling of the wave velocity ratios. The average wave velocity ratio in the southwest area of Zipingpu reservoir was higher than the northeast area. It can therefore be inferred that the phenomenon is related to the fault distribution and the underground media of the region of the southwest area of Zipingpu reservoir.

**Key words:** Zipingpu reservoir  $V_P/V_S$  ratio Underground medium