

珊溪水库地震波速比时空分布特征

钟羽云¹ 张震峰¹ 阚宝祥¹

1 浙江省地震局,杭州市塘苗路 7 号,310007

摘 要:选取 P 波、S 波到时差 $\Delta t \leq 14$ s 的台站数据,使用多台和达法计算珊溪水库地震序列地震波速比,结合地震序列的时空分布特征和发震构造,分析序列的波速比时空分布特征。1)珊溪水库 90% 的地震波速比分布在 1.66~1.75,波速比平均值为 1.70;2)珊溪水库地震序列包含有多组地震活动,每组地震的波速比呈开始快速下降之后缓慢上升的变化,每两组地震之间的波速比呈现逐渐增大的趋势,其波速比的变化特征可以归纳为“下降-回升-发生一组地震”;3)波速比的变化和震中位置的迁移有一定关系,地震迁移到新的位置时最初几次地震的波速比较大,随后波速比逐渐减小;4)波速比沿深度方向和双溪-焦溪垵断裂方向分布不均匀,位于水库淹没区的双溪-焦溪垵断裂西北段波速比较小,位于水库库岸的双溪-焦溪垵断裂东南段波速比在深度方向上的变化最复杂,存在两个高、低值相间的区域,4 级以上地震均发生在这一段 5~8 km 深度处的波速比高、低值过渡区域。

关键词:珊溪水库;波速比;时空分布

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A

水库蓄水后将导致库水向下渗透,改变库基岩体的应力状态和介质性质,诱发地震活动^[1]。由于水的作用,地壳介质的物理性状将产生一系列变化,如出现微破裂、扩容、塑性硬化及相变等,地震波通过地壳介质时,地震波速、波速比和地震波 Q 值等与震源区介质有关的参数均将发生变化。岩石力学实验也表明,岩石中流体的存在将会影响岩石介质的地震波传播特性。例如,施行觉等^[2]通过实验测量和理论计算认为,当饱和度高于某值时含水量的增加可使 P 波波速增加 30% 左右。史譔等^[3]认为地震波速度不仅与岩石饱和度有关,还与不同饱和阶段的孔隙流体分布有关,并且进水和失水过程中纵波、横波速度与饱和度关系显示出不同的规律。

本文使用多台和达法计算珊溪水库地震序列地震波速比,结合地震序列的时空分布特征和发震构造,分析序列的波速比时空分布特征,探索其在地震预测中的应用,并用“扩容-流体扩散或扩容-进水模式”(简称 DD 模式)进行解释。

1 地震活动与地质背景

珊溪水库位于浙江省温州市飞云江干流上游河段,坝址位于文成县珊溪镇上游 1 km 的峡谷

处,水库绝对坝高 156.8 m,坝长 308 m,设计最大库容 18.24×10^9 m³,最高水位 154.75 m。水库蓄水之前,库区历史上没有发生过地震。水库于 2000-05-12 开始下闸蓄水,2002-07-28 发生 3.5 级地震,之后库区每年都有地震活动。截止到 2014-07-31,珊溪水库记录到 0 级以上地震共 3 869 次,其中 3.0~3.9 级地震 46 次,4.0 级以上地震 13 次,最大为 2006-02-09 的 4.6 级地震。地震具有成丛、成组分布的特点(图 1),每一组地震相当于一次震群活动。因此,珊溪水库地震序列是由多个震群构成的地震活动。震群是指最大震级与次大震级之差 ΔM 小于 0.6^[4],地震活动缓慢开始并缓慢结束且数目很多的一群地震。通常使用震级差 ΔM 、地震能量释放均匀度 U 和地震能量分布均匀度 K 等参数来描述和判定地震序列类型,如果 $K \geq 0.05$,则为震群型^[5]。2002-07-28~2013-12-31 珊溪水库地震序列主要由 5 次震群活动组成(表 1)。

珊溪水库位于华南褶皱系浙东南褶皱的温州-临海拗陷带南部,即泰顺-温州断拗。库区在太古代结晶基底上,沉积了巨厚的中生代火山碎屑及河湖相沉积,库区岩性主要为侏罗系上统火山碎屑岩、白垩系下统河湖相沉积岩夹火山岩。

库区的断裂构造以北东向压扭性、北西向张扭性断裂构造为主,其次为东西向和南北向,断层规模都很小,宽度多在 10 m 以内,长度均小于 25 km,深度达 5 km 以上,切穿基底变质岩。库区范围内有 14 条断裂,多为盖层断裂,发育在上侏罗统火山岩及下白垩统火山沉积岩地层中。北东向断裂带内挤压构造透镜体、劈理发育,形成于前中生代,破碎带剥蚀较浅,往往被北西向断裂切割。北西向断裂带内挤压构造透镜体、断层泥及片理发育,断裂形成于燕山晚期。

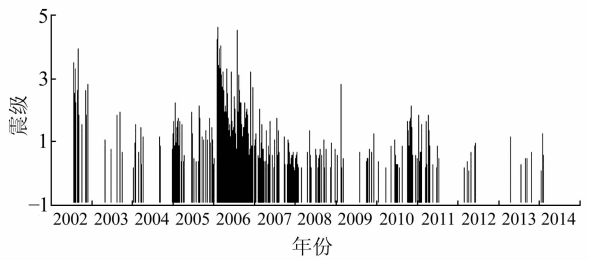


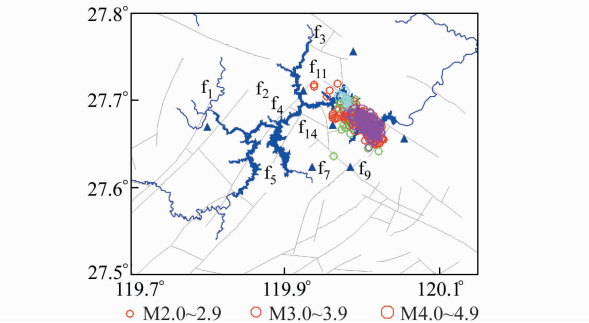
图 1 珊溪水库地震序列分布
Fig. 1 Shanxi reservoir earthquake sequence distribution

表 1 珊溪水库地震序列震群参数

Tab. 1 Shanxi reservoir earthquake swarm parameter for sequence earthquake

起止时间	最大震级 M	ΔM	ΔM≤0.5 地震次数	U	K
2002-07-28~2002-09-10	3.9	0.4	2	0.90	0.50
2005-01-01~2005-03-03	2.2	0.1	5	0.83	0.72
2006-02-04~2006-07-25	4.6	0.2	11	0.21	0.67
2006-07-31~2007-03-29	4.5	0.5	2	0.24	0.35
2010-05-15~2011-07-18	2.1	0.3	12	0.77	0.67

对地震重新定位表明,绝大部分地震发生在大坝上游的文成县珊溪镇与泰顺县包垟乡交界处的水库库区,集中分布在一个由北西向 f_{11} 和 f_9 、北东向 f_7 和近南北向 f_3 多组断裂围限的梯形块体内,块体内有近东西向断裂 f_{14} 穿过(图 2,蓝:2002~2003,绿:2004~2005,紫:2006-02,红:2006-03 之后)。



▲台站: f_1 思坑-司前断裂; f_2 百丈坑-蝉头断裂; f_3 白丈口-排前断裂; f_4 洪口-章坑断裂; f_5 江口-汇溪断裂; f_7 南浦-焦溪垟断裂; f_9 东坑-章坑断裂; f_{11} 双溪-焦溪垟断裂; f_{14} 岩上断裂

图 2 珊溪水库库区震中与断裂分布图
Fig. 2 Shanxi reservoir epicenter and fault distribution

发震构造研究表明,珊溪水库地震序列是由 NW 向双溪-焦溪垟断裂 f_{11} 右旋走滑的主破裂与 NE 向南浦-焦溪垟断裂 f_7 、NW 向东坑-章坑断裂 f_9 、NEE 向岩上断裂 f_{14} 等多个次要破裂共同作用的结果^[6]。并且地震活动有沿断裂迁移的现象:2002~2003 地震主要发生在水库淹没区,震中比较集中(图 2);2004~2005 地震开始向水库南岸迁移,震中变分散;2006 年后震中的优势分布方向为 NW,与穿过库区的 NW 向双溪-焦溪垟断裂走向一致^[7-8],并且 2006-02 地震主要发生在水库南岸的双溪-焦溪垟断裂东南段,2006-03 以后的地震则分布在整个老震区。

2 资料与数据处理

利用浙江、福建区域台网资料和珊溪水库地震台网资料,采用多台和达法计算珊溪水库地震序列波速比,即根据 P 波走时和 P 波、S 波到时差的线性关系得到波速比值(v_p/v_s)、线性相关系数 R 和波速比的计算误差 γ 。

$$\frac{v_p}{v_s} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i t_{p_i} - \sum_{i=1}^n t_{p_i} \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \tag{1}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{p_i} - \overline{t_{p_i}})(\Delta t_i - \overline{\Delta t_i})}{[\sum_{i=1}^n (t_{p_i} - \overline{t_{p_i}})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \overline{\Delta t_i})^2]^{1/2}} \tag{2}$$

$$\gamma = \left(\frac{v_p}{v_s} - 1\right)^2 \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t_{p_i})^2}{(n-2)[n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2]} \right\}^{1/2} \tag{3}$$

其中, $\Delta t_i = t_{s_i} - t_{p_i}$, t_{p_i} 为 P 波走时, t_{s_i} 为 S 波走时, n 为每个地震到时数据个数, γ 为波速比的计算误差, $\delta t_{p_i} = (t_{p_i} - t_0) - \Delta t_i (v_p/v_s - 1)$ 。

影响波速比计算精度的主要因素有直达 P 波和 S 波的到时判读精度、参与拟合的台站个数和地震定位精度等。为尽可能降低上述因素的影响,本文选择 P 波、S 波到时差 $\Delta t \leq 14$ s 的台站数据,即距离震中小于 120 km 的台站直达波到时资料进行计算。由于珊溪水库地震震中非常集中,减少了地震分布过于分散而导致路径差异增大的影响,提高了波速比计算的稳定性。珊溪水库地震震中 120 km 范围内有 18 个台站,其中震中 30 km 范围内有 7 个台站。每次计算地震波速比时,至少有 4 个台站以上的数据(一律采用 Pg 和 Sg 震相数据),最多达到 18 个台站数据。

地震震相的判读精度将直接反映在相关系数和计算误差中,如果震相的判读精度较低,则导致波速比计算误差过大,湮没波速比的异常信息。使用重新定位后的发震时刻数据进行波速比计算,选取相关系数 $R \geq 0.95$ 、计算误差 $\gamma \leq 0.085$ (即大于 5% 的波速比异常是可信的) 的结果,得到 768 次地震波速比计算结果。珊溪水库 90% 的地震波速比分布在 1.66 ~ 1.75,波速比平均值为

1.70,计算误差集中分布在 0.01 ~ 0.05,并且波速比并不随震源深度而变化(图 3)。虽然 2002-07 ~ 2003-03 震中区没有地震观测台站,但是震中 120 km 范围内有 11 个台站,台站分布也比较合理,1.8 级以上地震均在 4 个以上台站中有记录,波速比计算的拟合相关系数均在 0.99 以上,能够满足计算的拟合精度。2003-04 以后震中区先后建起地震台站,资料更为丰富。

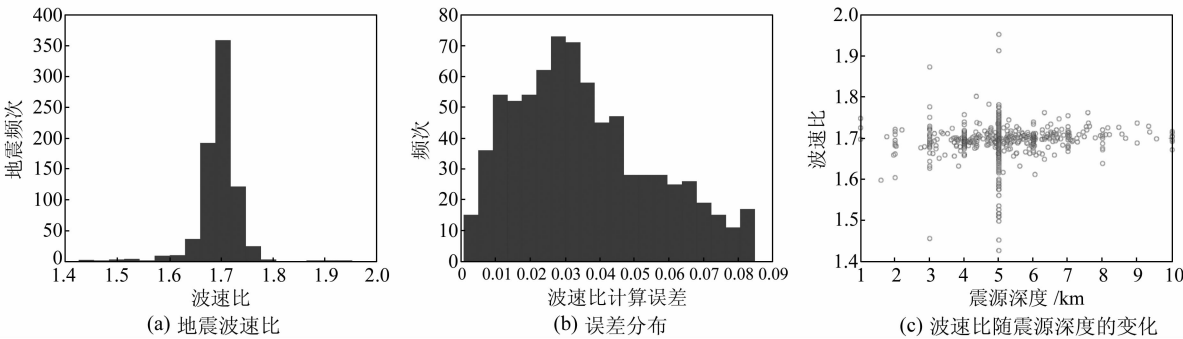


图 3 珊溪水库地震波速比、误差分布以及波速比随震源深度的变化
Fig. 3 Shanxi reservoir seismic wave velocity and the error distribution, and changes of wave velocity ratio with focal depth

3 时间和空间变化特征

珊溪水库地震序列包含有多组地震活动,每一组地震可以划分成 2 个阶段:开始阶段 2 次地震间的时间间隔短、频度高,震中位置集中;后一阶段地震之间的时间间隔逐渐增长,频度逐渐降低,震中开始向周边迁移。波速比的变化与地震的阶段分布特征有一定的关系,每组地震开始阶段的波速比均呈现出快速下降,后一阶段波速比呈现出缓慢上升的变化,并且下降比上升要快;每两组地震之间的波速比一般都呈现出逐渐增大的趋势。因此,可以把珊溪水库地震序列波速比的变化归纳为“下降-回升-发生一组地震”(图 4)。一次震群结束后到下一次震群发生前的一段时间,地震频度低,持续时间相对较长,图 4 对波速比逐渐回升的过程显示得比较清楚。由于每一次震群包含的地震次数很多,图 4 对每一次震群波速比的变化过程显示不清楚,为了能够更清楚地了解波速比的变化过程,把表 1 所列震群(2005 年的震群由于样本少而没有包括)开始阶段的波速比绘于图 5。可以看到,4 次震群的开始阶段波速比均呈现出下降趋势。

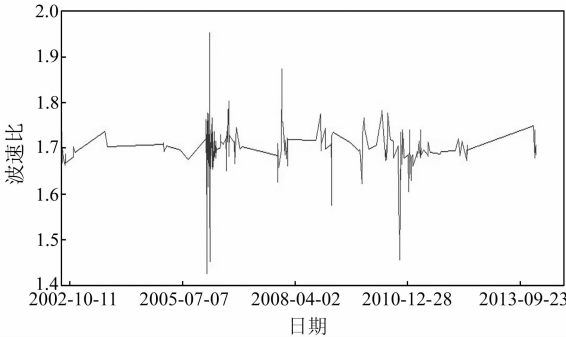


图 4 珊溪水库地震波速比随时间变化
Fig. 4 Shanxi reservoir seismic wave velocity ratio changes with time

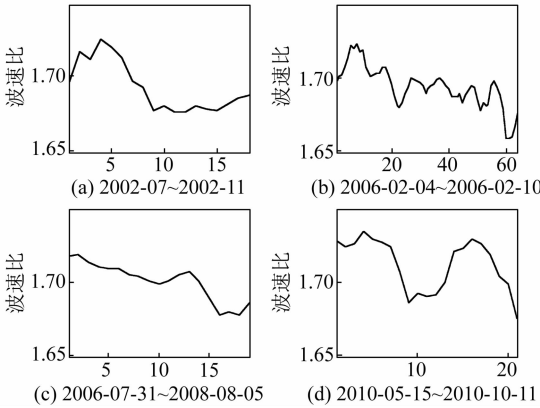


图 5 表 1 中每次震群开始阶段波速比变化
Fig. 5 Variation of wave velocity ratio of earthquake swarm in Shanxi reservoir

一次地震就是一次岩体破裂或一次原有断裂的重新活动,小震的发生形成了良好的渗水通道,导致库水渗入较深部位或者周边其他地方,引发后续地震。每一组地震的开始阶段由于地震密集发生,岩体破裂后,水的渗透速率未能使岩石达到

水饱和状态,岩体主要表现为孔隙度增加、饱和度减小,从而导致波速比下降;后一阶段由于地震的时间间隔增加,水在岩体中的渗透更加充分,岩石

的水饱和度逐渐增加,最终处于饱和状态,波速比缓慢回升。随着岩石的水饱和度增加,孔隙压力增大,断层面的有效剪应力减小,断层滑动的危险性增加,新一丛地震又将开始。因此,每一丛地震的开始阶段波速比较大,随后逐渐减小。孔隙流体是引起波速比变化的主要原因,符合 DD 模式对波速比变化的解释。

波速比的变化和震中位置的迁移有一定关系,地震迁移到新的位置时最初几次地震的波速比一般较大,随后逐渐减小。例如,2002-07 地震主要发生在双溪-焦溪垭断裂水库淹没区一段,2003-08 地震开始向水库南岸迁移,直至 2005 年地震均发生在水库南岸。与此相应,2003-08-21 发生的 1.8 级地震波速比为 1.736,随后波速比逐渐减小,至 2005-08-27 发生的 2.1 级地震波速比为 1.673 7,减小了约 4%。2006-02 地震虽然仍发生在水库南岸,但开始向东靠近双溪-焦溪垭断裂方向迁移,开始了新的一丛地震活动。这一丛地震最初几次地震波速比均大于 1.71,其中 2006-02-04 的 4.2 级地震波速比达到 1.761 7,此后,波速比逐渐减小,至 2006-02-09 的 1.8 级地震波速比为 1.599 5,减小约 9%。

将 2002-07~2014-02 共计 764 次地震的波速比按照 500 m×500 m 网格,绘出波速比的空间分布图(图 6)。图 6 表明,沿双溪-焦溪垭断裂波速比分布不均匀,总体上是靠近断裂且位于水库淹没区的西北段波速比较小,靠近断裂且位于水库库岸的东南段较大,但离开断裂一定距离后情况又有所不同。事实上,震中离开断裂的距离间接地反映了震源深度,即离开断裂越远则震源深度越大。为研究波速比在深度方向的分布,在双溪-焦溪垭断裂西南侧选取点 A(119.93°E, 27.72°N)和点 B(120.07°E, 27.64°N),AB 为通过震中区且平行于双溪-焦溪垭断裂的直线。将 AB 两侧各 5 km 的地震波速比全部投影到 AB 剖面上,按照 500 m×1 000 m 进行网格化,绘出波速比在 AB 垂直剖面上的分布(图 7)。图 7 表明,波速比存在 3 个低值区。第 1 个低值区位于点 A 东南约 4 km 处,从较浅的 2 km 处一直延伸到 6 km 处。该区域位于双溪-焦溪垭断裂的水库淹没区一段,是 2002-07 最初发生地震的地方。第 2 个低值区位于水库库岸至双溪-焦溪垭断裂与岩上断裂相交一段。这一段波速比在深度方向上的变化最复杂,存在 2 个高、低值相间的区域,4 级以上地震均发生在这一段 5~8 km 深度处的波速比高、低值过渡区域。第 3 个低值区位于双溪-

焦溪垭断裂与岩上断裂相交处东南的水库淹没区。

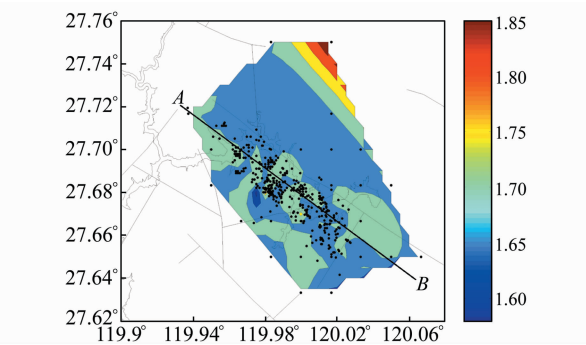


图 6 珊溪水库地震波速比空间分布
Fig. 6 Shanxi reservoir seismic wave velocity spatial distribution

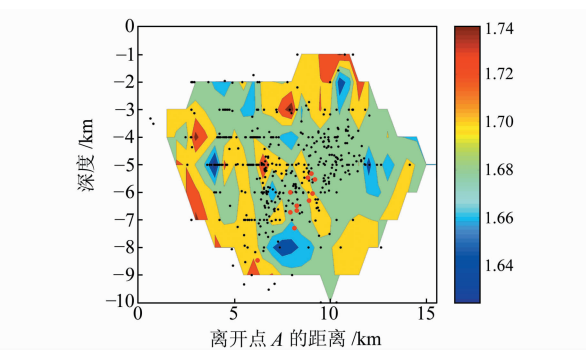


图 7 珊溪水库地震波速比在垂直剖面上的分布
(黑色点: $M_L \leq 3.9$, 红色点 $M_L \geq 4.0$)
Fig. 7 Shanxi reservoir seismic wave velocity distribution in the vertical section of the AB

4 结 语

本文使用 P 波、S 波到时差 $\Delta t \leq 14$ s 的台站数据计算地震波速比。为了进一步选取可靠性较高的波速比进行分析,选取台站数 ≥ 4 、相关系数 $R \geq 0.95$ 、计算误差 $\gamma \leq 0.085$ 的计算结果,得到 768 次地震波速比。结合珊溪水库地震序列的时空分布特征和发震构造,波速比的时空分布具有如下特征:

- 1) 珊溪水库 90% 的地震波速比分布在 1.66~1.75,波速比平均值为 1.70。
- 2) 珊溪水库地震序列包含有多组地震活动,每组地震波速比均呈现出开始阶段快速下降、后一阶段缓慢上升的变化。每两组地震之间的波速比一般都呈现出逐渐增大的趋势。珊溪水库地震序列波速比的变化特征可以归纳为“下降-回升-发生一组地震”。
- 3) 波速比的变化和震中位置的迁移有一定关系,地震迁移到新位置时最初几次地震波速比一般较大,随后逐渐减小。
- 4) 沿深度方向和沿双溪-焦溪垭断裂方向波速比分布不均匀。位于水库淹没区的双溪-焦溪

垠断裂西北段波速比较小。位于水库库岸的东南段波速比在深度方向上的变化最复杂, 存在 2 个高、低值相间的区域, 4 级以上地震均发生在这一段 5~8 km 深度处的波速比高、低值过渡区域。

参考文献

[1] 刘远征, 马瑾, 姜彤, 等. 库水渗流与荷载对水库地震形成的影响分析[J]. 地震地质, 2010, 32(4): 570-585 (Liu Yuanzheng, Ma Jin, Jiang Tong, et al. Analysis of Effect of Reservoir Water Seepage and Loading on the Occurrence of Earthquakes[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(4): 570-585)

[2] 施行觉, 徐果明, 靳平, 等. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 1995, 38: 281-28 (Shi Xingjue, Xu Guoming, Jin Ping, et al. The Laboratory Study of Influence of Water Saturation on Rock S Velocity and Attenuation[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38: 281-28)

[3] 史譔, 沈联蒂. 岩石含水饱和度、频率、流体类型对声波振幅影响规律的探讨[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1993, 29(4): 458-465 (Shi Ge, Shen Liandi. The Investigation of the Influence of the Degree of Saturation, Frequency and Fluid Type on the Sonic Wave Amplitude in Sandstones[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1993, 29

(4): 458-465)

[4] 蒋海昆, 张晓东, 单新建, 等. 中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社, 2014 (Jiang Haikun, Zhang Xiaodong, Shan Xinjian, et al. Research Chinese Statistical Characteristics and Prediction Method of Reservoir Seismic[M]. Beijing: Seismological Press, 2014)

[5] 郭大庆. 地震现场工作大纲和技术指南[M]. 北京: 地震出版社, 1998 (Guo Daqing. Seismic Field Work Outline and Technology Guide[M]. Beijing: Seismological Press, 1998)

[6] 钟羽云, 张帆, 赵冬. 珊溪水库 $M_L4.6$ 震群精确定位与发震构造研究[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 158-165 (Zhong Yuyun, Zhang Fan, Zhao Dong. Precise Relocation and Seismogenic Structure of the Shanxi Reservoir[J]. Journal of Seismological Research, 2011, 34(2): 158-165)

[7] 蒋海昆, 傅征祥, 刘杰, 等. 中国大陆地震序列研究[M]. 北京: 地震出版社, 2007 (Jiang Haikun, Fu Zhengxiang, Liu Jie, et al. Study on Earthquake Sequence in China[M]. Beijing: Seismological Press, 2007)

[8] 钟羽云, 周昕, 张帆, 等. 2006 年温州珊溪水库地震序列特征[J]. 华南地震, 2007, 27(1): 21-30 (Zhong Yuyun, Zhou Xin, Zhang Fan, et al. Seismic Sequence Characteristics of the 2006 Shanxi Reservoir Earthquake in Wenzhou[J]. South China Journal of Selsmology, 2007, 27(1): 21-30)

The Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Seismic Wave Velocity Ratio in Shanxi Reservoir

ZHONG Yuyun¹ ZHANG Zhenfeng¹ KAN Baoxiang¹

¹ Earthquake Administration of Zhejiang Province, 7 Tangmiao Road, Hangzhou 310007, China

Abstract: This paper selects P, S wave arrival time difference $\Delta t \leq 14$ s data, and calculates the Shanxi reservoir earthquake sequence seismic wave velocity using the multi-station method, combined with the characteristics of temporal and spatial distribution of seismic sequence and seismic structure. Analysis of the temporal and spatial distribution characteristics of wave velocity ratio sequence shows: 1) The seismic wave velocity ratio in Shanxi reservoir is 90% concentrated in 1.66-1.75, with an average velocity ratio of 1.70. 2) Shanxi reservoir earthquake sequence comprises a plurality of seismic activity. Each group of seismic velocity ratio starts by showing a rapid decline; after a phase of wave velocity ratio showing changes slowly rising. Wave velocity ratios between every two groups of earthquakes generally show a gradually increasing trend. Variation characteristics of wave velocity ratio in Shanxi reservoir earthquake sequence can be summarized as “drop-rebound-a group of earthquake”. 3) There is some relationship between the wave velocity changes and epicentral location. As the earthquake migrates to the new position, the initial several seismic wave velocity ratio is relatively large, and then the velocity ratio gradually reduces. 4) Along the depth direction and along the Shuangxi-Jiaoxiyang fracture direction, wave velocity distribution is not uniform. Wave velocity ratio is relatively small in the northwest segment of the Shuangxi-Jiaoxiyang fault submerged in the reservoir; wave velocity shows the most complex variation in the southeast segment of Shuangxi-Jiaoxiyang fracture. Located in the south bank of the reservoir, there are two transition regions of high value and low value wave velocity ratios. An $M_L \geq 4$ earthquake occurred in the transition region at a 5-8 km depth.

Key words: Shanxi reservoir; wave velocity ratio; temporal and spatial distribution