

# 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

冯德益 虞雪君\* 盛国英\*\*

(天津市地震局)

## 摘 要

本文研究了一些水库诱发地震前的波速比变化。结果表明:(1)在水库诱发地震( $M=2-6$ )前均可观测到波速比异常;(2)前兆异常时间 $\Delta T$ 和震级 $M$ 的关系为 $\log \Delta T = aM + b$ ,其斜率明显小于天然构造地震;(3)在震级相同的情况下,水库诱发地震的波速比异常区比天然构造地震小得多。所得结果可用来区分水库诱发地震与天然构造地震,本文给出了一个具体应用实例。

关键词:水库诱发地震;波速比异常;异常持续时间

## 一、前言

在我国约有10%的水库发生诱发地震,其中最大的是1962年发生在新丰江库区的6.1级地震,它使大坝遭受损害。因此,水库诱发地震的预测和预防是一个很重要的问题。为此,应该研究水库诱发地震前所出现的各种前兆。本文介绍了水库诱发地震前的波速比异常的初步研究结果。

## 二、水库诱发地震前的 $V_p/V_s$ 变化

图1、图2和图3分别给出了新丰江水库<sup>(2)</sup>、龙羊峡水库和美国 Monticello 水库<sup>(3)</sup>诱发地震前的波速比随时间变化曲线。

由图1可见,新丰江水库的地震活动性和波速比变化均与水库蓄水相关<sup>(2)、(4)</sup>。根据冯锐的研究结果,1961年2月至1975年3月在库区发生了11次 $M > 4.3$ 级地震,除在主震以后立即发生的5次地震外,其余地震震前都出现过相似形态、不同幅度的 $V_p/V_s$ 负异常,而且在1962年3月19日 $M_6.1$ 主震前出现了最显著的 $V_p/V_s$ 异常。各次地震的波速比异常形态相同,即呈现“下降—恢复—地震”的过程,最大变化量约为正常值的11%。 $V_p/V_s$ 异常的持续时间约为11个月。

龙羊峡水库是我国黄河上游的一座大型水库,库区的地震活动性很低,在1981年9

\* 浙江省地震局

\*\* 国家地震局兰州地震研究所

月至10月的短期蓄水期间诱发了最大震级为  $M_L=2.5$  的小震群,地震前  $V_p/V_s$  值减小,其异常时间在8天以上。坝区周围30km范围内的  $V_p/V_s$  变化、蓄水水位和地震活动特征三者之间具有一定的相关性(图2)。

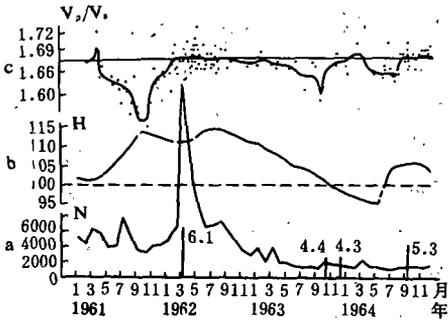


图1 新丰江水库区地震波速比、库区水位和地震频度的对比  
a. 地震月频度; b. 库区水位(m); c. 波速比

Fig. 1 Comparison of velocity ratio, impounding water level and seismic frequency in the Xinfengjiang Reservoir area.

B. K. Rastogi 和 P. Talwani 曾发现,美国 Monticello 水库区发生的  $M_L=2.0-2.7$  地震前,  $t_s/t_p$  或  $V_p/V_s$  出现明显异常(图3)<sup>[3]</sup>。

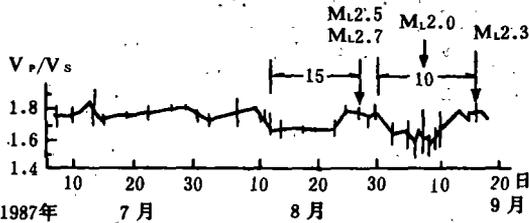


图3 Monticello 库区的  $V_p/V_s$  变化  
Fig. 3 The  $V_p/V_s$  variation in the Monticello Reservoir area

取自文献[3]。第7号地震发生在第8号地震的孕育过程当中,故其  $V_p/V_s$  回升阶段不明显,这与天然地震前类似情况的  $V_p/V_s$  变化特性相似<sup>[1]</sup>。由图2可以看出,除1981年11

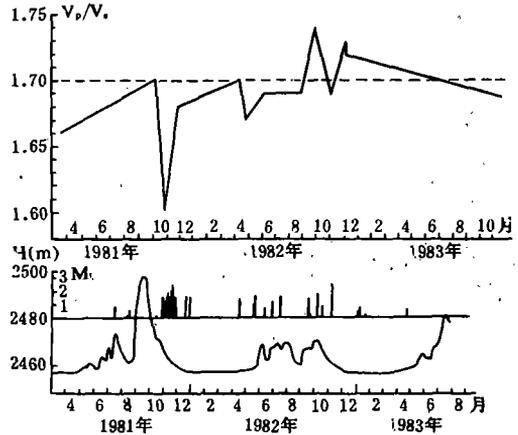


图2 龙羊峡库区波速比、蓄水水位和地震活动性的对比( $V_p/V_s$  的误差小于 0.05)\*

Fig. 2 Comparison of velocity ratio, impounding water level and seismicity in the Longyangxia Reservoir area (the error of  $V_p/V_s$  is smaller than 0.05)

### 三、水库诱发地震前 $V_p/V_s$ 异常的时空特性

上述水库诱发地震前  $V_p/V_s$  异常变化幅度与前兆时间,即从异常开始到主震发生的持续时间  $\Delta T$  的数据见表1。其中第1至5号地震的数据取自文献[2]和[4],第6至8号地震的数据

\* 蓄水水位和地震活动性参见《龙羊峡地区地壳稳定性研究》一书。

月23日  $M_L 2.5$  级地震外,1982年4至11月间还发生过一些小地震,最大者为11月7日  $M_L 2.6$  级。但由于它们在时间上比较分散,难于确定2.6级地震前半月内  $V_p/V_s$  是否出现过异常。

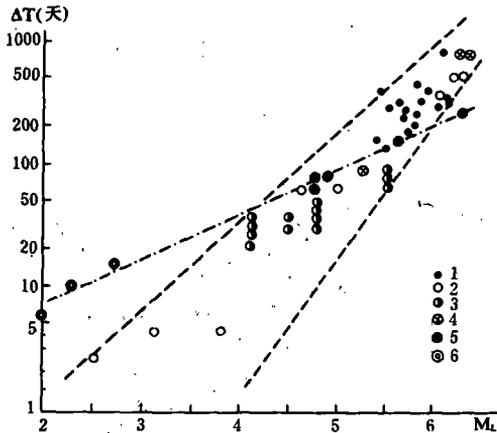


图4  $V_p/V_s$ 异常的前兆时间 $\Delta T$ 与震级 $M_L$ 的关系  
1. 中国地震; 2. 美国地震; 3. 苏联地震;  
4. 日本地震; 5. 中国水库诱发地震;  
6. 美国水库诱发地震

Fig. 4 Relationship between precursory time  $\Delta T$  of  $V_p/V_s$  anomaly and magnitude  $M_L$

由表1得到的前兆时间 $\Delta T$ 与水库诱发地震震级 $M_L$ 间的关系如图4所示。为便于比较,中、美、苏、日的一系列天然构造地震的 $\Delta T$ 和 $M$ 的相应关系也绘于图4<sup>[1]</sup>。由图4可见,水库诱发地震和天然地震 $\lg \Delta T$ 均随 $M$ 大致呈线性增加,对于水库诱发地震其相关直线的斜率明显小于天然构造地震。所以,在震级较大时水库诱发地震的 $\Delta T$ 可能要比相同震级的天然地震短得多,而在震级较小时则相反。冯锐<sup>[2]</sup>和Rastogi、Talwani<sup>[3]</sup>分别研究了新丰江水库诱发地震和Monticello水库诱发地震的 $V_p/V_s$ 异常的空间分布特征,发现其一般特性与文献[1]讨论的天然地震相似,但是,异常区的尺度比相同震级的天然构造地震小得多。例如新丰江水库区发生的 $M_L 6.1$ 和 $M_L 4.5-5.3$ 地震前,异常区的最大尺度仅为20km和5-10km<sup>[2]</sup>。根据文献

[1]的研究结果,相同震级的天然地震的异常区尺度应至少分别为120km和80-90km<sup>[1]</sup>。

表1 中国和美国的—些水库诱发地震前的 $V_p/V_s$ 异常

序号	发震日期	水库	$M_L$	$M_s$	最大异常变化	$\Delta T$ (天)
1	1962-03-19	新丰江	6.3	6.1	11%	340
2	1963-10-6	(中国)	4.8	4.4	5%	75
3	1964-09-23		5.6	5.3	4%	150
4	1967-09-09		4.8	4.4	2%	60
5	1972-12-18		4.9	4.5	2%	75
6	1978-08-27	Monticello	2.7, 2.5		6%	15
7	1978-09-06	(美国)	2.0		8%	6
8	1978-09-15		2.3		12%	10
9	1981-11-26	龙羊峡 (中国)	0.3-2.5(16次)		12%	8天 以上

## 四、初步讨论与结论

基于上述研究结果可以得到如下初步结论:

1. 在  $M=2-6$  级水库诱发地震前,可以观测到  $V_p/V_s$  的异常变化,因此,可将其应用于水库地震的预报研究。

2. 水库诱发地震前  $V_p/V_s$  异常的前兆时间  $\Delta T$  与其震级  $M$  的关系可近似地用线性关系式  $\lg \Delta T = aM + b$  来表示,其斜率明显低于用天然构造地震统计的相应斜率。

3. 水库诱发地震的  $V_p/V_s$  异常区尺度较相同震级的天然构造地震小得多。

上述水库诱发地震前的波速比异常时空分布特征可能与水库诱发地震的发震机制有关。发生诱发地震的水库库区一般都具有较高的初始构造应力。水库蓄水后,随着水位的增高,处于较低围压下的浅层岩石的渗透性急剧增加,如果库区底部或边缘分布有较多的断裂,这些浅层断裂内水就首先达到饱和。断裂面内水的饱和压力降低了有效正压力,在地表自由面的作用下浅层断裂向地面扩展,由此诱发了浅源小震。小震的发生形成了良好的渗水通道,导致水渗入较深部位,较深部位断裂的扩展就可能形成较大的水库地震。所以水库蓄水将加速构造应力以地震形式释放。因此,水库地震的孕育时间将明显地较同等强度的天然地震短,水库地震前波速比异常时间也比同等强度的构造地震更短一些。

震级较小的水库地震一般都发生在 5km 以内的浅层。由于浅层断裂围压较低,在发震前一些断裂有可能发生蠕滑,使得波速比异常时间延长,因此震级较小的水库地震的波速比异常时间比同等强度构造地震更长一些。

由于上述原因,也可以使得水库地震的波速比异常时间  $\Delta T$  与地震震级之间相关直线的斜率会明显地小于天然构造地震。

由于水库蓄水后水的作用仅改变了应力场局部范围内的应力状态和介质强度,致使局部地段的裂缝增长加速、小震频繁,因而局部介质具有更高的不均匀性。在孕育同等强度地震时,介质不均匀处引起的应变范围往往比在介质较均匀处引起的应变范围小。因此,水库地震前波速比异常区的尺度较同等强度构造地震小。

以上初步研究结果可用于判别水库诱发地震与天然构造地震。本文以 1990 年 4 月 26 日青海共和 6.9 级地震(36.1°N, 100.3°E)为例说明。

该次地震震中距龙羊峡水库\*仅 60km 左右,极震区烈度为 IX 度,水库区处于 VI 度异常区内<sup>(5)</sup>。图 5、图 6 分别给出了该次地震前  $V_p/V_s$  异常的空间展布范围和  $V_p/V_s$  随时间的变化。由图 5、图 6 可以看出,其  $V_p/V_s$  异常区最大线度超过 200km,异常时间  $\Delta T$  超过 4 年,因此,从  $V_p/V_s$  异常特征来看,共和 6.9 级地震属于典型的构造地震。

\* 该水库坝高 178m,坝长约 600m,设计库容 247 亿  $m^3$ ,发震时实际蓄水 122 亿  $m^3$

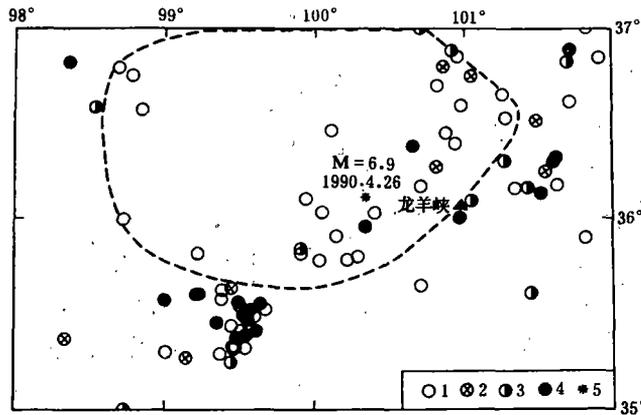


图5 1990年4月26日共和6.9级地震前小震波速比的平面分布及异常区的大致范围

1.  $r \leq 1.680$ ; 2.  $1.680 < r \leq 1.690$ ; 3.  $1.690 < r \leq 1.720$ ; 4.  $r > 1.720$ ; 5. 主震震中

Fig. 5 Spatial distribution and anomalous region of velocity ratio of small earthquakes before the Gonghe M=6.9 earthquake on April 26, 1990

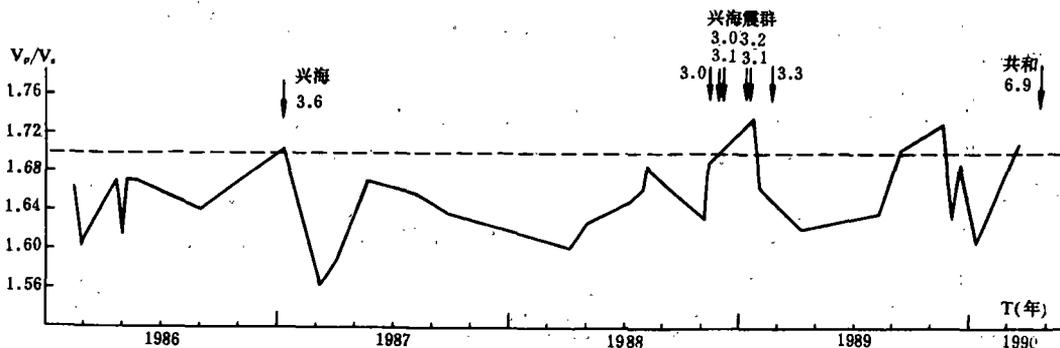


图6 共和6.9级地震前  $V_p/V_s$  随时间的变化

Fig. 6 Temporal variation of  $V_p/V_s$  before the Gonghe M=6.9 earthquake

(本文1992年6月29日收到)

### 参考文献

- [1] 冯德益, 地震波速异常, 地震出版社, 1983.
- [2] 冯锐, 新丰江6.1级水库诱发地震前后波速比的变化, 地球物理学报, Vol. 20, No. 3, 1977.
- [3] B. K. Rastogi and P. Talwani, Spatial and temporal variations in  $t_s/t_p$  at Monticello Reservoir, South Carolina, Geophys. Res. Lett., Vol. 7, No. 10, 781—784, 1980.
- [4] 王妙月等, 新丰江水库诱发地震的震源机制及其成因的初步研究, 地球物理学报, Vol. 19, No. 1, 1976.
- [5] 刘志刚、张守谊等, 青海省共和—兴海地震震害调查报告, 工程抗震, No. 3, 1990.
- [6] 冯德益、顾瑾平等, 波速异常的进一步研究和问题讨论(一), 西北地震学报, Vol. 8, No. 3, 1986.

(7)冯德益、郭瑞芝、高原,波速异常的进一步研究和问题讨论(二)——S波分裂的某些研究,西北地震学报,  
Vol. 14, No. 1, 1992.

## FURTHER STUDY AND DISCUSSION ON THE ANOMALIES OF SEISMIC WAVE VELOCITY(Ⅲ)

— $V_p/V_s$  Variations before Reservoir-Induced Seismic Events

Feng Deyi, Yu Xuejun\*, Sheng Guoying\*\*

(*Seismological Bureau of Tianjin City, China*)

### Abstract

The variations of the seismic velocity ratio before some reservoir-induced seismic events are studied synthetically. These seismic events include the Xinfengjiang Reservoir impounding earthquakes ( $M_s = 6.1, 5.3, 4.5, 4.4, 4.4, 4.3$ ), the Longyangxia Reservoir impounding small swarm ( $M_L = 2.5$ ) in China, and the induced seismic events ( $M_L = 2.7, 2.5, 2.0, 2.3$ ) at the Monticello Reservoir in the USA. The main results are:

(1) The  $V_p/V_s$  anomaly may be observed before the reservoir-induced seismic events in a wide magnitude range from  $M = 2.0$  to  $M > 6.0$ ;

(2) The relationship between the precursory time  $\Delta T$  and magnitude  $M$  of reservoir induced earthquakes shows clustering about a linear increase in  $\lg \Delta T$  with  $M$ , but the slope of the average line  $\lg \Delta T = aM + b$  for reservoir induced seismic events is remarkably smaller than that for natural tectonic earthquakes;

(3) The  $V_p/V_s$  anomalous area of a reservoir-induced seismic event is much smaller than the area of a natural tectonic earthquake with the same magnitude.

The results obtained may be used to distinguish the reservoir-induced seismic event from the natural tectonic earthquake. An actual example is given.

**Key Words:** Reservoir-Induced Seismic Event; Anomaly of Seismic Velocity Ratio; Precursory Time

\* Seismological Bureau of Zhejiang province

\*\* Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB