

短 文

## 陕西泾阳地区的地震活动与冯村水库关系探讨

毛 娟<sup>1</sup>, 邢西淳<sup>1</sup>, 邵辉成<sup>2</sup>, 王军儒<sup>2</sup>

(1. 陕西省地震局泾阳地震台, 陕西 泾阳 713704; 2. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 根据微震相对频度原理提取微震信息, 分析了泾阳震群的活动特征, 应用相关分析法探讨了泾阳地区的震群活动与冯村水库库容变化和口镇—关山断裂活动的关系, 认为泾阳地区的震群活动是构造地震, 是区域应力场控制的结果, 与水库无关。

**关键词:** 泾阳震群; 微震相对频度; 水库地震

中图分类号: P315.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2003)04-0370-04

### 0 引言

陕西关中泾阳地区的地震活动自 1970 年开始, 其中 1970 年 2 月 14 日在泾阳—三原间发生了  $M_L 2.4$  地震; 1974 年 1 月 7 日在泾阳东北发生了  $M_L 2.3$  地震。1976 年间发生了 3 次震群, 最大主震为  $M_L 3.7$ , 同期还发生了近邻的周至震群。当年华北及鄂尔多斯周缘地区强震活动频繁: 华北地区发生了唐山 7.8 级大地震, 山西发生了太原震群, 和林格尔发生了 6.3 级地震。同年陕西小震活动频次是常年的 3 倍以上, 说明关中盆地的地震活动与华北区域应力场的调整变化有关。1982~1985 年间周至、泾阳老震区又发生了多次震群, 主震  $M_L 2.9$ 。9 年后 1994~1995 年渭河盆地周至、泾阳同时发生多次小地震(图 1)。1998 年 1 月 5 日泾阳永乐地区发生了  $M_L 5.2$  地震后, 引起了省内外地震工作者的关注, 对泾阳震群的成因存在有不同的认识, 文献 [1] 认为是在华北区域应力场作用下北北西向构造活动的结果; 文献 [2] 认为是较大范围区域应力场加强的反映; 而文献 [3] 认为泾阳震群是冯村水库蓄水所致。本文试图采用微震相对频度法、地震序列法、地震活动性、垂直形变分析等方法, 通过不同角度探讨泾阳地区弱震活动的成因机制及其活动规律, 回答泾阳地区的震群活动是构造地震还是水库诱发地震的问题。

### 1 泾阳地区的地震地质背景

泾阳地区地处渭河盆地腹地, 是莫霍面等深线急剧变化的地段, 也是环境剪应力值  $\tau_0$  的高值异常区和  $V_P/V_S$  波速比的高值异常区<sup>[4]</sup>, 反映了该区存在地震活动的深部构造背景。区内有近东西走向的口镇—关山大断裂, 北东走向的乾县断裂和扶风—三原断裂等, 地震的发生与区域构造的活动密切相关。冯村水库建于 1970 年, 库区分布有两条北东和北西向共扼断层及两组相伴生的次级断裂(图 2)。地貌特征显示断层呈继承性构造活动。库区无基岩出露, 全是黄土覆盖层。1982 年 7 月水库正式蓄水, 库容规模约 1000 万方, 实际蓄水一般在 500 万方以下。1985 年 7 月以后水量在 100 万方以下。一般在每年的 7、8 月份有水, 平时水库是干库(图 3(a))。1982 年泾阳台正式投入观测后, 在 1983 年 4 月~1985 年 5 月间记录到距台 0~7 km 360 次左右的小地震, 震中密集于  $34^\circ 40' \sim 34^\circ 44' N$ ,  $108^\circ 48' \sim 108^\circ 53' E$  范围内。最大主震  $M_L 2.9$ (图 2)。

### 2 泾阳震群的微震信息

在泾阳震群序列中, 微震活动与全序列的强弱起伏变化过程存在着密切的关系, 具体表现在一个地震活动周期内有高潮期和相对弱的活动期及平静期。微震频度在地震总频度中所占的比例也随活动期的变化而变化。我们引用“微震相对频度”这一概念<sup>[6]</sup>, 即某一时间单元内微震频度与这一时间单元内地震总频度的比值, 给出了泾阳震群 1983 年 4 月至 1985 年期间的微震相对频度曲线(图 3(b)), 时间单位基本为一个月。看出泾阳小震在 1983 年间经历了 4~6 月、10~11 月两次较强的活动期和 7~9 月一次较弱的活动期, 12 月为平静期, 显示震区断层微破裂的过程是强—弱—强。从  $M_L > 1$  的  $M-T$  图也可大致反映这一点(图 3(c))。1984 年进入第 2 轮活动期后, 1~3 月为水平较弱的活动期, 4 月平静期, 5~12 月为有起伏的强活动期, 显示震区的微破裂较为剧烈。1985 年平静了 4 个月 5 月又发生了小震群, 但无论频次和强度都低于 1984 年, 而且震地点迁移到口镇—关山断裂东段的阎良附近。此后 9 年内地震稀少, 直到 1994~1995 年在老震区附近发生了 6 次小地震。而冯村水库在此期间由于 1994~1995 连年干旱为一座干库; 1996 年 7 月降雨蓄水; 1997 年又是干库; 1998 年 7~8 月降雨, 水量达 300 万方。到 1999 年 6 月 14 日在口镇—关山断裂东段的阎良关山发生了 3 次地震, 最大主震

收稿日期: 2003-01-10

基金项目: 中国地震局“三结合”项目

作者简介: 毛娟(1958-), 女(汉族), 陕西泾阳人, 工程师, 现主要从事测震、短水准工作。

为  $M_L 3.7$ 。可以看出,沿口镇—关山断裂活动的地震从 1983~1999 年经历了两个阶段:1983 年从泾阳台附近开始到 1985 年阎良关山附近的地震结束为第一个阶段;第二个阶段仍由 1994 年泾阳台附近开始到 1999 年 6 月阎良结束。其活动特征是地震频次逐渐减少,震中沿泾阳台向东北方向(沿口镇—关山断裂)迁移,震级增大。

泾阳地震的微震相对频度曲线可作为一种描述泾阳地区微震活动特征的前兆指标。根据现有资料分析,可得如下认识:在 1983 年 4 月 27 日泾阳  $M_L 2.9$  地震发生后,6 月份地震活动水平相对较低,但 7~11 月间的微震活动又逐渐增强,到 12 月的平静期才意味着这次活动期的结束;1984 年 1~3 月又进入了第二个相对弱的活动期,4 月又是一个平静期,意味着这次活动期的结束;此后又进入了第三个持续时间长的强活动期,显示出泾阳震群密集—平静交替、成群发生的特征。

微震相对频度的物理意义可理解为在某一地壳介质单元内一定数目的破裂现象中微破裂的优势程度。泾阳震群主震后微震相对频度强弱的变化和一般水库地震主震前的微震相对频度逐渐增大的前兆现象不同<sup>[9]</sup>。

### 3 构造活动、水库库容和泾阳震群的关系

#### 3.1 构造活动与泾阳震群的关系

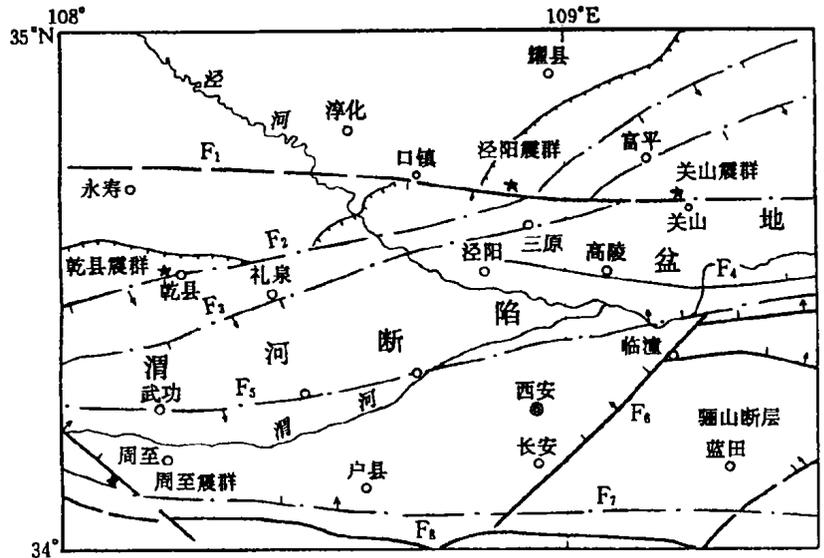
区域水准测量可反映一个地区的构造活动方式和垂直差异运动的强度。根据关中地区 70~80 年代的垂直形变速率图<sup>[7]</sup>可明显看出泾阳和三原地区是垂直差异运动显著的地区,大地形变经历了由强逆继承性构造运动(年垂直形变速率高达 6 mm/a)向强继承性构造运动的转折过程,说明该地区的区域应力场发生过较强的调整过程,存在孕育发生地震的构造背景。

定点跨断层资料反映了具体断层现今活动的连续动态变化特征。从跨口镇—关山断裂的泾阳台跨断层短水准高差变化曲线(图 4)看出,1983 年 5 月前断层活动平稳;5~10 月断层(继承性)活动加快,即上盘(南盘)相对下盘(北盘)下滑,与之对应的泾阳震群活动的频次高,强度大;11 月反向转折,到 1984 年 5 月断层呈逆继承性活动,显示断层可能受到区域应力场的挤压作用,1984 年 5 月~1985 年 12 月断层活动发生转折呈弱的继承性活动,泾阳小震活动也趋于平静。

从泾阳震群的震中分布看,震群密集于泾阳台 NE3~6 km 范围,深度在 5 km。1985 年向 NE 沿口镇—关山断裂向东端阎良迁移;1994 年回到老震区,1995、1996、1999 年又沿该断裂向 NE 端迁移,显示出与断裂的关系密切。

#### 3.2 水库诱发地震与泾阳震群关系

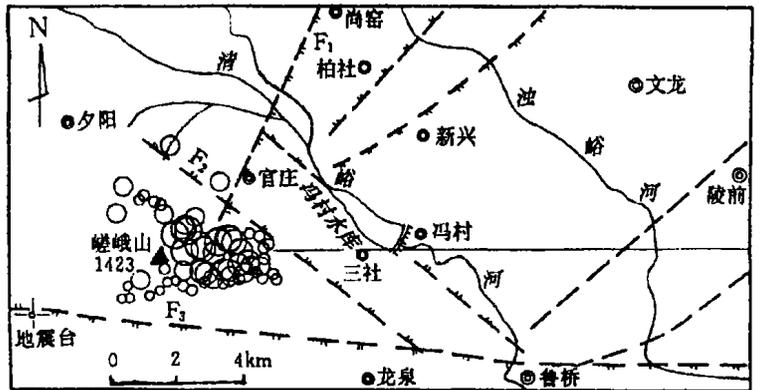
一般来讲水库初次蓄水容易诱发地震<sup>[8]</sup>。根据渗透效应和孔隙压力扩散的滞后性公式



$F_1$ : 口镇—关山断裂;  $F_2$ : 乾县断裂;  $F_3$ : 扶风—三原断裂;  $F_4$ : 高陵断裂;  $F_5$ : 渭河断裂;  $F_6$ : 长安—临潼断裂;  $F_7$ : 周至—余下断裂;  $F_8$ : 秦岭山前断裂

图 1 关中构造与震群分布图(震群)

Fig. 1 Distribution of the tectonics and earthquake clusters in Guanzhong region.



— 实测或推测正断层 ○  $M_L \geq 2.1$  地震 ○  $1.0 \geq M_L \geq 0.1$  地震  
- - - 推测的性质不明断层 ○  $2.0 \geq M_L \geq 1.1$  地震

图 2 冯村水库库区断层与小震群分布图

Fig. 2 Distribution of faults and small earthquake cluster in Fengcun reservoir region.

$$\tau = l^2 / c \quad (1)$$

式中  $l$  为距离;  $c$  为岩石扩散率;  $\tau$  为滞后天数. 我们取  $c = 5.8 \times 10^4 \text{ cm}^3 / \text{s}^2$ ,  $l = 5 \text{ km}$ , 求得  $\tau = 50$  天. 而冯村水库自 1982 年 7 月蓄水到 1983 年 4 月的 9 个月中并未发生地震.

据统计水库库容小于  $10 \text{ 亿 m}^3$ , 坝高在  $100 \sim 149 \text{ m}$  的水库发生诱发地震的概率很小<sup>[12]</sup>. 而冯村水库坝高不足  $35 \text{ m}$ , 库容仅几百万立方米. 水库地震的最大震级与水库规模有如下关系<sup>[10]</sup>:

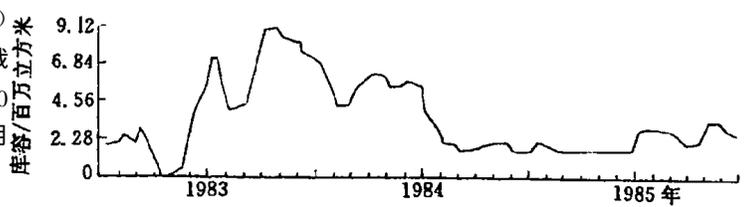
$$M_L = 1.204 + 1.024E \quad (2)$$

式中  $E$  为综合影响参数, 满足关系  $S = \frac{EV}{H_{\max}}$ ;  $H_{\max}$  为最大库深;  $V$  为库容;  $S$  为水库面积. 计算出冯村水库可诱发的最大地震为  $M_L 1.6$  而泾阳震群 (1983 年 4 ~ 5 月) 的最大主震为  $M_L 2.9$ .

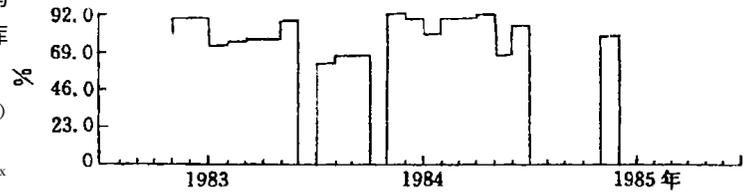
另据文献 [11], 水库诱发地震震级与水库蓄水后产生的地球转动惯量转化为变形能有关, 一般变形能的百分之几到百分之十以地震波的形式释放. 我们计算出冯村水库 10% 的变形能可引起  $M_s 1.08$  地震, 与式 (2) 结果相近.

### 3.3 水库诱发地震与泾阳震群的活动特征比较

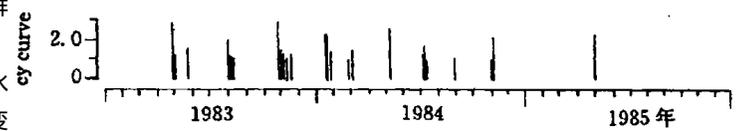
(1) 频率—震级关系: 泾阳震群  $M_L \geq 1$  地震的频度—震级关系线性相关很好,  $R = 0.98$ . 震群



(a) 库容变化曲线



(b) 微震相对频度曲线



(c)  $M-t$  图

图 3 冯村水库库容变化与泾阳小震相对频度曲线、 $M-t$  图

Fig. 3 The water storage in Fengcun reservoir, the relative frequency curve of small earthquake and  $M-t$  curve in Jingyang region.

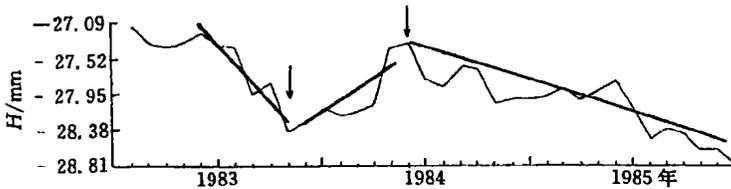


图 4 泾阳跨口镇—关山断裂短水准测量曲线

Fig. 1 Measurement curve of short-range leveling cross Kouzhen-Guanshang fault in Jingyang.

的  $b$  值在  $0.58 \sim 0.79$  间, 符合一般天然震群型地震特征, 而不符合水库地震  $b$  值  $\geq 1$  的特征<sup>[13]</sup>.

(2) 余震衰减特征: 泾阳震群属主震(双主震)—余震型, 余震序列符合频度衰减规律  $n(t) = n_1 t^{-h}$ ,  $h$  值在  $1.1 \sim 1.2$  间, 与我国七级以上大震的余震衰减系数相近<sup>[14]</sup>. 不符合水库地震衰减系数  $\leq 1$  的特征<sup>[13]</sup>.

(3) 主震—余震关系: 泾阳震群  $M_m$  (主震) 与  $M$  (最大余震) 之差基本上都  $\geq 1$ , 不符合水库地震  $M_m$  与  $M$  之差  $< 1$  的特点<sup>[13]</sup>. 此外泾阳震群  $M/M_m < 1$ , 也不符合水库地震  $M/M_m \approx 1$  的特点<sup>[13]</sup>.

(4) 震群的同步性: 泾阳 1976 年间发生了 3 次震群 (1976-10-29 ~ 11-22, 泾阳), 同期发生地震的还有近邻的周至震群 (1976-11-22 ~ 23); 乾县 (1984-06-06) 震群和泾阳 (1984-05 ~ 06) 震群及泾阳 (1985-05-02) 地震和乾县 (1985-05-14) 地震几乎同时发生; 1994 ~ 1995 年泾阳和周至又几乎同时发生震群. 1997 年 11 月玛尼 7.9 级地震不久, 1998 年 1 月 5 日在泾阳永乐地区发生了  $M_L 5.2$  地震, 汾渭断陷盆地相继发生了临猗 5.0 级地震, 1999 年 6 月 14 日阎良(关山)震群(主震  $M_L 3.7$ )、大荔 3.3 级地震. 这说明渭河盆地的地震活动包括震群活动是区域应力场作用下区域构造运动的结果.

(5) 震源机制: 泾阳震群的震源机制解与华北地区的震源机制结果非常一致, 说明泾阳震群是在区域应力场作用下, 北北西向构造活动的结果, 震源错动方式亦受华北应力场控制<sup>[1]</sup>.

## 4 结论

(1) 泾阳震群主震后微震相对频度的变化过程与一般水库地震前微震相对频度逐渐增大的前兆现象不同;

- (2) 泾阳震群的发震时间与冯村水库的库容变化无相关关系, 最大震级大于该水库可能引起的诱发地震最大震级;
- (3) 泾阳震群的活动特征如衰减特征、主余震关系、 $b$ 值、及与周围地震的同步性都与水库诱发地震不符;
- (4) 从地形变测量, 跨断层水准测量, 震中迁移路线, 震源机制解等来看, 泾阳震群与构造活动关系密切, 受统一区域应力场控制。

因此认为泾阳震群与冯村水库蓄水无关。

### [参考文献]

- [1] 丁蕴玉, 薛勇杰. 泾阳小震群的活动特征[J]. 地震学报, 1985, 7(3): 337—341.
- [2] 谢家树. 渭河盆地地震群活动特征[J]. 地震研究, 1985, 8(4): 467—477.
- [3] 易学法, 姜家兰, 王振武, 等. 冯村水库引起的小震群活动[J]. 地震, 1988, 7(3): 14—18.
- [4] 丁蕴玉, 狄秀铃, 袁志祥. 渭河断陷地壳三维S速度结构和 $V_p/V_s$ 分布图象[J]. 地球物理学报, 2000, 43(2): 194—202.
- [5] 邢西淳, 王争良, 毛娟, 等. 泾阳4.8级地震前后泾阳短水准垂直形变异常分析及探讨[J]. 大地形变测量, 2000, 16(2/3): 65—72.
- [6] 蔡作馨. 水口水库诱发地震的微震前兆信息与趋势预测[J]. 地震, 1997, 17(1): 98—101.
- [7] 张四新, 张希. 关中垂直地形变特征[J]. 地震, 1997, 17(4): 404—410.
- [8] 谢蓉华. 二滩水库蓄水一年的地震活动[J]. 地震地磁观测与研究, 2000, 21(1): 12—21.
- [9] Kranz R I et al. The permeability of whole jointed Barre granite[J]. J. Rock Mech., Min. sci., 1979, 6: 225—234.
- [10] 任金卫. 澜沧江小湾水库诱发地震的断裂构造条件分析[J]. 内陆地震, 1993, 7(1): 31—37.
- [11] 李强兴, 徐礼华, 孔文涛, 等. 丹江口水库诱发地震的能量计算[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2002, 19(2): 5—9.
- [12] 武汉地震大队水库地震队. 水库地震[J]. 地震战线, 1977, 4—6.
- [13] 杨志荣, 田兆光, 安景生, 等. 新疆克孜尔水库地震危险性预测研究[J]. 地震, 2001, 21(1): 39—45.
- [14] 王碧泉, 王春珍. 余震序列的时空特征[J]. 地震学报, 1983, 5(4): 383—395.
- [15] 王卫东, 王平. 泾阳4.8级地震的震源参数和震源机制解[J]. 地震学报, 1998, 20(6): 656—658.
- [16] 邢西淳, 王争良, 毛娟, 等. 泾阳4.8级地震的地形变特征[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(4): 75—79.

## DISCUSSION ON RELATIONSHIP BETWEEN SEISMICITY AND FENG CUN RESERVOIR IN JINGYANG REGION, SHAANXI PROVINCE

MAO Juan<sup>1</sup>, XING Xi-chun<sup>1</sup>, SHAO Hui-cheng<sup>2</sup>, WANG Jun-ru<sup>2</sup>

(1. Seismic Station of Jingyang, Shaanxi Jingyang 713704, China;

2. Seismological Bureau of Shaanxi Province, Shaanxi Xi'an 710068, China)

**Abstract:** Bases on relative frequency of small earthquakes, the seismic information of Jingyang earthquake clusters is obtained and the characters of the clusters are analyzed. Using correlative analysis method the relationship among the earthquake clusters, the water storage in Fengcun reservoir and the tectonic activity of Kouzhen—Guanshan fault in Jingyang region is discussed. The result shows that the earthquake clusters in Jingyang region are tectonic earthquakes, controlled by regional stress field, and have no relation with Fengcun reservoir.

**Key words:** Earthquake cluster of Jingyang; Relative frequency of small earthquakes; Reservoir seismicity