

## 小浪底水库诱发地震监测及研究

张新东, 阎俊岗, 张小涛, 谭 青

(河北省地震局邯郸中心台, 河北 邯郸 056001)

**摘要:**利用 2009 年小浪底地震台网数字化改造后记录到的 2009—2011 年水库周围 20 km 范围内发生的地震, 分析其时空分布特征以及其中 61 次地震的震源机制解。结果表明, 小浪底水库存在诱发地震活动, 以弱震和微震为主, 最大  $M_L$  2.8。地震集中分布在 2 个丛集区, 分别与库区的石井河断层、塔底断层有关。库区地震的张应力轴与构造背景最大主压应力轴方向基本一致, 倾角  $30^\circ$  左右, 表明这些地震是在受到一定的相对直立压应力作用下发生的, 可能与水库蓄水后库水载荷的长期作用有关。

**关键词:** 小浪底水库; 小震活动; 震源机制解; 水库诱发地震

中图分类号: P315.728

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)增刊-0085-04

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.增刊.0085

## Monitoring and Research on Xiaolangdi Reservoir Induced Earthquakes

ZHANG Xin-dong, YAN Jun-gang, ZHANG Xiao-tao, TAN Qing

(Central Seismostation of Handan, Handan Hebei 056001, China)

**Abstract:** In this paper, using earthquakes occurring in a range of 20 km around Xiaolangdi reservoir from 2009 to 2011, which were recorded after the digital transformation of Xiaolangdi seismic network at the end of 2009, we analyzed their spatial and temporal distributions and the focal mechanism solutions of 61 earthquakes among them. The results show that there are induced earthquakes in the Xiaolangdi reservoir in which weak shocks and micro earthquakes of largest  $M_L = 2.8$  predominate. The earthquakes are concentrated in two cluster regions, which are related to Shijinghe-fault and Tadi-fault respectively. The tensile stress axis of reservoir-induced earthquakes is basically consistent with that of maximum principal stress of tectonic setting; the dip angle is no longer horizontal, but about  $30^\circ$ . It shows that these earthquakes occur under the action of certain relatively vertical stress, which may be related to the long-term effect of reservoir water after the storage.

**Key words:** Xiaolangdi reservoir; small earthquake; focal mechanism solution; reservoir-induced earthquake

### 0 引言

黄河小浪底水库于 1997 年截流, 2001 年底竣工。小浪底水利枢纽坝顶高 281 m, 正常高水位 275 m, 库容 126.5 亿  $m^3$ , 长期有效库容 51 亿  $m^3$ 。

小浪底水库数字地震台网<sup>[1]</sup>于 2009 年 1 月完

成了数字化改造并通过验收, 投入正式运行。测震台网主要监测小浪底大坝为中心半径 150 km 范围内的地震、爆破等活动, 并提供被监测区域附近 4 级以上有感地震信息, 为小浪底枢纽的安全监测提供基础数据。台网包括 8 个测震子台和 1 个台网中

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 2013 年河北省地震局地震星火项目(2013-3-10)

作者简介: 张新东, 男, 高级工程师, 主要从事地震监测及地震学研究工作。

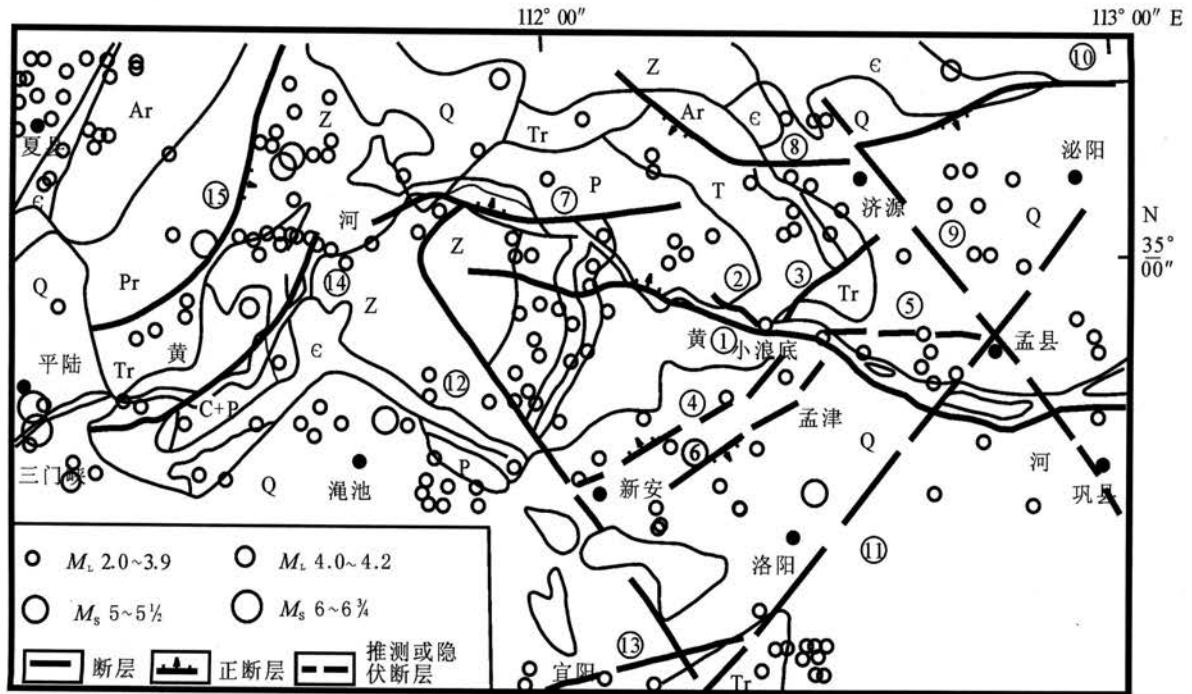
心,测震子台分别布设于黄河两岸,其中东沟台、上孟庄台、螃蟹蛟台和当腰台位于黄河北岸济源市境内,王良台、乔岭台、青石台和南关郎台位于黄河南岸洛阳市境内。本文利用 2009 年小浪底地震台网数字化改造后记录到的 2009—2011 年水库周围 20 km 范围内发生的地震,分析了其时空分布特征以及其中 61 次地震的震源机制解,讨论了小浪底水库

地震的诱发机制。

### 1 小浪底库区地质构造及历史地震情况

#### 1.1 小浪底库区地质构造背景

本区处于秦岭东西向构造带,从整体轮廓来看,由西向东,构造线延展则出现 NE—EW—NW 向的规则变化。小浪底水库库坝区和周边展布着多条第



①石井河断层; ②小南庄断层; ③连地断层; ④王良断层; ⑤坡头断层; ⑥霍村断层; ⑦塔底断层; ⑧封门口断层; ⑨五指岭断层; ⑩盘古寺断层; ⑪焦洛断层; ⑫城崖地断层; ⑬宜阳断层; ⑭石家沟断层; ⑮架桑断层

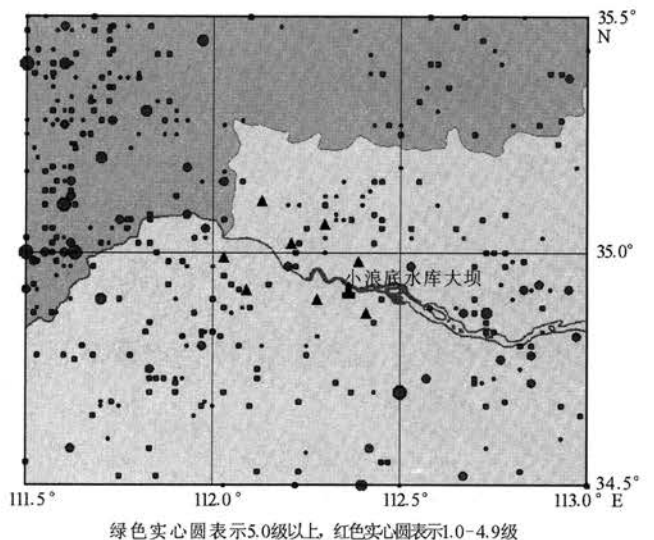
图 1 小浪底水库区活断层分布(据相关文献整理)

Fig. 1 Distribution of active faults in Xiaolangdi reservoir area (according to relevant literatures)

四纪活动断层<sup>[2]</sup>(图 1),其中城崖地断层、塔底断层和石井河断层是库区较重要的 3 条大断层,其它一些小断层都是与这 3 条断层力学作用机制相一致的次一级断层。

#### 1.2 库区历史地震活动

图 2 是根据中国历史强震目录(中国地震局震害防御司,1955)和中国地震台网中心地震目录,自—519 年—2008 年 12 月 31 日(小浪底地震台网数字化改造前),做出的小浪底库区范围(东经 111.5°~113.0°,北纬 34.5°~35.5°)内地震震中分布图。历史地震 540 次,其中 1964 年以前记录地震 4 次,1964—1969 年记录地震 5 次,以上 9 次地震震级都在 4.7 级以上。1970 年以后记录地震 531 次,说明 1964 年以前无仪器记录的小震都遗漏了。1964—1969 年本区的地震监控能力仅能达到 4.7 级以上地震。如果从 1970 年以后记录地震的情况来看,



绿色实心圆表示 5.0 级以上, 红色实心圆表示 1.0~4.9 级

图 2 小浪底库区地震台站及历史地震震中分布图

Fig. 2 Distribution of seismic stations and historical earthquake epicenters in Xiaolangdi reservoir area

本区地震活动背景总体来说较为微弱,以小震和微震为主,最大地震发生在 1970 年 08 月 07 日(北纬  $35.40^{\circ}$ ;东经  $111.6047^{\circ}$ )的 4.7 级地震。

## 2 水库台网记录到的库区地震活动与水库水位关系

2009 年 1 月—2011 年 12 月,小浪底地震台网记录到监测范围内(距小浪底大坝 150 km 范围)地震 381 次。在这 381 次地震中,距离库区 20 km 范围内的地震有 211 次。图 3 是小浪底台网记录的 211 次库区范围内的地震震中分布图。其中 0.0~0.9 级地震 31 次,1.0~1.9 级地震 61 次,2.0~2.9 级地震 18 次,3.0~3.9 级地震 1 次,没有 4.0 级以上地震发生。从空间分布上看,大坝附近没有记录到地震,地震主要集中在二处(图 3)。其中在距离大坝约 50 km、水库河流南岸 10 km 范围内的一丛集中分布,地震沿着黄河河道优势分布,且与石井河断层的走向和位置基本一致(图 1)。另外也有几次地震集中在库尾塔底段层与河流交汇处。

图 4 给出了 2009—2011 年度水库库区(河岸边 20 km 范围内的 211 次地震)月平均水位、月最高水

位和小震月频度统计度曲线。2009 年 11 月,在新安发生了 95 个地震组成的小震群,造成当月地震频次统计的高值,其他时间库区黄河河流两岸地震活动平稳,地震的发生和水位的相关关系不明显。

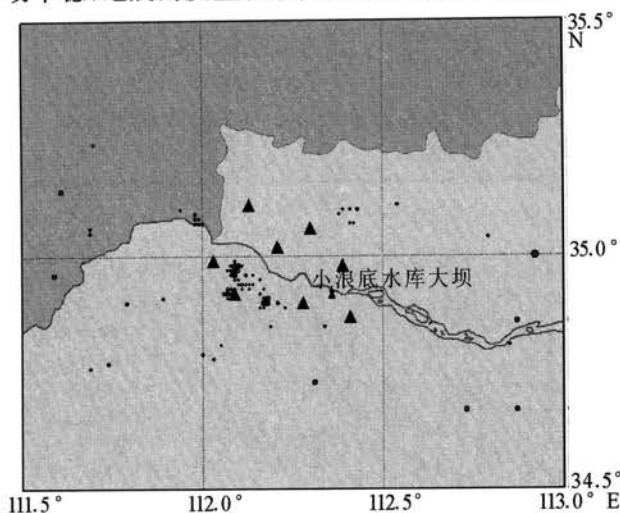


图 3 小浪底库区地震台站及 2009—2011 年地震震中分布图

Fig. 3 Distribution of seismic stations and earthquake epicenters from 2009 to 2011 in Xiaolangdi reservoir area

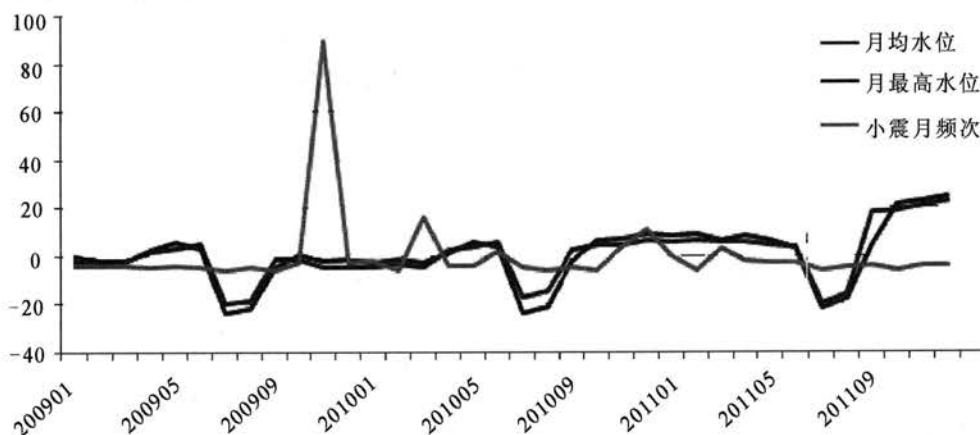


图 4 小浪底水库月平均水位、月最高水位和小震月频度曲线(各自减各自的平均值)

Fig. 4 Mean monthly water level, maximum monthly water level and frequency curve of small earthquake month of Xiaolangdi reservoir (each subtracts its mean value)

## 3 小浪底库区的构造应力场特点及库区地震震源机制解

小浪底库坝区和周边还展布着多条第四纪活动断裂<sup>[2]</sup>(图 1),主要是老断层的新活动(复活),如塔底断层、石井河断层、城崖地断层等形成于燕山期及前燕山期,在近期仍有明显活动,城崖地断层主体走向  $NW315^{\circ}$  左右,倾向 NE,倾角  $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,全长 100 km 以上,是本区的大断裂之一;塔底断层近 EW 走

向,总延伸长约 38 km,断层性质为左旋扭动的正平移断层;石井河断层总体走向  $285^{\circ}$ ,总延伸长度 40 km 以上。

我们利用振幅比方法计算了 2009 年 1 月—2011 年 12 月小浪底台网记录到的 61 次小震机制解,并根据小震震源机制解结果,统计得到 P 轴走向优势分布为 NEE 向,倾角  $30^{\circ}$  左右;张应力 T 轴优势方向为 NS 向,倾角  $30^{\circ}$  左右;中间轴 B 轴方向

NWW,倾角较为水平。地震多为倾滑断层活动特征。小震机制解的压应力轴与区域背景构造应力场最大主压应力的倾角有所差异,可能一定程度反映蓄水水体的重力作用。小浪底地区现代地壳应力场

特征是最大主应力  $\sigma_1$  和最小主应力  $\sigma_3$  近于水平,倾角多小于  $20^\circ$ ;中间主应力  $\sigma_2$  近于直立;最大主应力  $\sigma_1$  方位为 NEE 向。

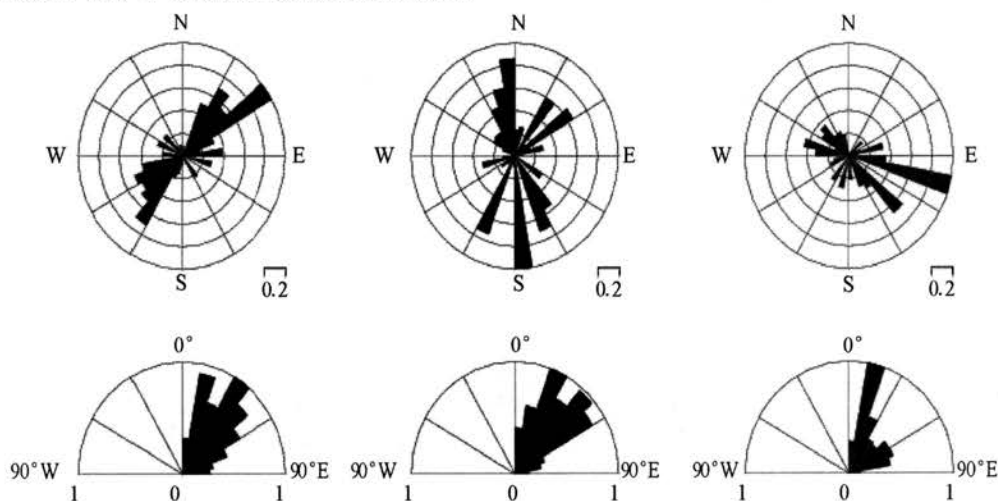


图5 震源机制解 P、T、B 轴方位角、倾角统计(上排依次为 P、T、B 轴方位角,下排依次为 P、T、B 轴倾角)

Fig. 5 Statistics of azimuths and dip angles of P、T、B axis according to focal mechanism solution (the upper row includes azimuths of P、T、B axis in turn, the bottom row includes dip angles of P、T、B axis in turn)

#### 4 讨论及分析

小浪底库区出露地层比较复杂,有沉积岩、变质岩和岩浆岩<sup>[1]</sup>。其中出露的沉积岩中包括有碳酸岩类岩石,出露的变质岩中包括有千枚岩和片麻岩类岩石。碳酸岩类岩石的存在说明库区存在发生岩溶型水库诱发地震的条件;千枚岩和片麻岩类岩石的存在说明库区动力变质作用强烈,岩石中裂隙、节理发育,存在发生裂隙型水库地震的条件。

根据 61 次小震机制解的结果,库区的张应力轴与构造背景最大主压应力轴方向基本一致,但倾角不再水平,而是有  $30^\circ$  左右的倾角,表明这些地震是在受到相对直立的压应力作用下发生的,可能与水库蓄水后,库水载荷的长期作用有关。小浪底水库 2001 年正式蓄水,蓄水后至 2009 年台网改造前的地震发生情况不明。根据 2009 年至 2011 年的记录

情况看,水库周围 20 km 范围内发生 211 次地震,其中震源深度小于 10 km 的 54 次,且以弱震和微震为主(2.0 级以上 4 次,最大  $M_L 2.8$ )。地震集中分布在 2 个丛集区(图 2),且分别与与石井河断层、塔底断层有关。这些地震可能是水库诱发地震。

#### 参考文献

- [1] 河北省工程地震勘察研究院. 小浪底水利枢纽遥测地震台网数字化改造项目竣工报告[R]. 2008.
- [2] 水利部黄河水利委员会勘测规划设计院. 黄河小浪底水利枢纽初步设计报告附件—工程地质勘察报告[R]. 1988.
- [3] 姚文斌. 郑州市地震小区划研究文集[M]. 北京:地震出版社, 1993.
- [4] 贺为民,刘明军,李智毅,等. 小浪底水库断裂构造分析与诱发地震预测[J]. 华南地震, 2001, 21(1):63-68.