

# 从新丰江水库地震的环境条件讨论水诱发地震的研究及其预测

李安然 张飞飞 张 柯

(国家地震局地震研究所, 武汉)

**提 要** 新丰江水库诱发6.1级地震与库区存在库水渗透(漏)一储积(存)及孕(诱)震的活动构造有关。水库诱发地震预测应重视库区总体环境条件的研究。对比新丰江库及长江三峡水库的环境组合条件,认为三峡水库三斗坪坝址诱发水库地震的可能性很小,而庙河一香溪库段存在有利于诱震的环境因子,发震的可能性较大,但其震级将不超过 $5\frac{1}{2}$ 级。

**关键词** 水库地震 诱震环境因子 水库地震预测 新丰江水库 长江三峡水库

60年代初,广东省新丰江水库蓄水后诱发了大量的地震活动,引起了各级政府和有关科研部门的关注和重视,并为此采取了一系列相应措施,诸如组织技术力量开展新丰江水库地震研究、加固坝体增强其抗震能力等。这些工作虽属补救性质,而且耗资不少,但提高了抗震设防烈度后的大坝却刚好能经受住1961年3月19日 $M_s=6.1$ 级的主震而避免了一场灾难性的破坏和伤亡,同时在研究新丰江水库地震过程中还积累了相当丰富的基础资料,大大促进了我国水诱发地震研究工作的发展。30年后的今天,在纪念这一水诱发事件及其科研工作成就的时候,再回顾新丰江水库地震的前前后后,确实能从中得到诸多有益的启示。作为其中一个方面,本文作者基于对新丰江水库地震诱发环境的认识,提出了评估、研究水诱发地震的一种基本思路,同时结合长江三峡水库诱发地震可能性的分析讨论了它的可行性。

## 1 新丰江水库地震的诱发环境条件

有关新丰江水库地震产生的地质环境,前人已经进行过很多研究,尤其是广东省地震局更是做了大量的工作<sup>[1-3]</sup>在以往这些工作基础上,结合近年来我们对中国大陆东部几个诱震水库区的地质调查<sup>[4]</sup>,试对新丰江水库地震的诱发环境条件提出一些再认识。

如图1所示:新丰江水库位于近东西向延伸的燕山期花岗岩体上,四周边缘分布着古生代—新生代的沉积岩层,如泥盆系的碳酸岩和砂页岩以及侏罗系、白垩——第三系的砂

页岩等。库坝区断层裂隙发育,它们大体上可划分为NNE—NEE、NNW—NNW两大组,花岗岩体本身就是沿其中一组断裂侵入的。由于多组断裂切割,库区地壳形成大大小小纵横交切的破碎(裂)带及其分割的地质块体,其中特别显著的是库首区的峡谷地带及其两侧地段,如回龙峡谷区的岩石破碎等。这些断裂,有的贯穿库区,有的则位于库域边缘,形成库水向地下渗漏的主要通道。而在库区外围,则是未受切割的完整花岗岩体和透水性微弱的侏罗系砂页岩、第三系砂砾岩,它们成为阻止库水向外扩散(渗)的屏障,因而便促使水体沿可透水岩层和断层裂隙渗入库底之下并且集中在库区一定深度上储存起来。

从区域构造环境分析,新丰江水库所在的东南地洼区<sup>[5]</sup>属中生代时期的活动(化)构造区<sup>[6]</sup>。该区现今是处在主压应力大致为NW—NNW向的构造应力场作用下<sup>[3]</sup>,致令库坝区的一些断裂系统产生新活动。

区内最发育的断裂系统是NNE向逆断层,如河源断裂、人字石断裂等,倾角 $30^{\circ}$ — $45^{\circ}$ ,具有多期活动特点;库区南、北侧的白垩—第三系盆地基底中的NEE向断裂,倾角陡直,多表现出倾滑活动;在新丰江峡谷区和库区东侧的NNW向断裂,倾角 $60^{\circ}$ — $90^{\circ}$ ,具张剪性活动特征,诸如双塘断层、碓坑断层等。这组NNE向断裂系统在地表多表现为小型错动带或密集的剪切裂隙带,切割NNE向和NEE向两组断裂,并且断裂带上的古河道变迁、阶地分布和其他构造地貌特征以及地震震中等均一致地表明是一组第四纪时期的活动断层<sup>[4]</sup>。此外,水库地震的震源机制解和波谱分析结果亦证实库坝区NNW向断裂系统是与新丰江水库诱发地震事件成因密切相联系的<sup>[1]</sup>。

综上所述,新丰江水库区具备了以下两种诱发水库地震的基本环境因素(子):

其一是库水渗透(漏)—储积(存)条件:水库底盘的花岗岩体周缘有透水岩层排布以及库区多组断层裂隙切割,形成了库水入渗的良好通道,加之库域四周环绕的隔水层(体),既促成库水直接向下渗透(漏),又形成了一个封闭的储水环境使得大量入浸的库水得以在库底深处积存起来。

其二是孕(诱)发地震的活动构造条件:入渗—储积起来的库水由于软化润滑、减小孔隙液压等物理—化学作用<sup>[7]</sup>,促使库区地壳浅层长期累积的构造应力—应变能沿软(薄)弱面(即活断层)释放,从而诱发了水库区地震活动。

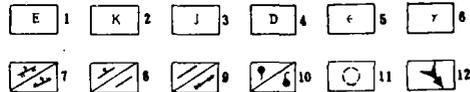
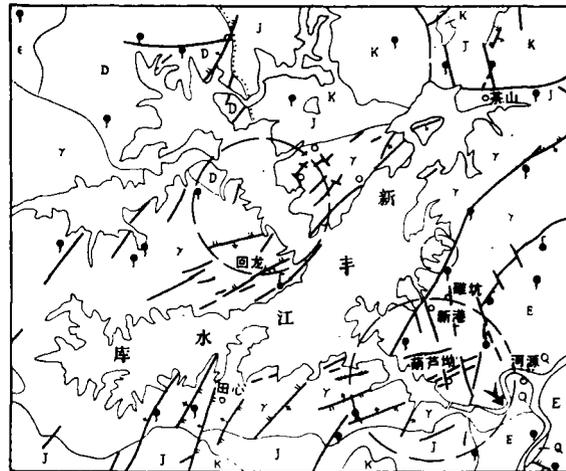


图1 新丰江水库区地质环境略图

Fig. 1 Sketch map of geologic environment of Xinfengjiang Reservoir area

1. 第三系; 2. 白垩系; 3. 侏罗系; 4. 泥盆系;
5. 寒武系; 6. 燕山期花岗岩; 7. a. 逆断层 b. 正断层;
8. a. 压剪性断层 b. 剪性断层; 9. a. 性质不明断层 b. 挤压带; 10. a. 下降泉 b. 热水泉;
11. 震中密集区; 12. 地下水流方向

## 2 研究水诱发地震的一种基本思路

新丰江水库地震的诱发环境分析表明：水诱发地震必须在震源附近存在渗入—储积起来的水的作用才能促成地壳中所累积的应变能释放，即是说诱震区（库段）只有具备库水渗透（漏）—储积的水文地质条件和应力—应变能积累与释放地震构造条件，才有可能产生水诱发地震。因此研究、预测诱发地震（含水库地震）应当按以下思路（程序）进行：

2.1 调查水域（库坝区）及其周缘的地层岩性、断层裂隙系统、岩溶和其他不连续地质界面的分布产状、组合形式等，分析水向下渗透（漏）的可能性及入渗水的集中储存条件；

2.2 在分析大区域现代构造环境的基础上，查明工作区（如库坝区）构造应力、活动断层、应力—应变的积累与释放以及地震活动性等特点，研究其地震构造条件；

2.3 水域或库区各种静态和动态环境因素的综合研究，包括地层岩性、活动断层、岩溶裂隙等分布产状及其组合关系，探索三维、动态的水诱发地震的总体组合环境条件，其中如具备水体渗透（漏）—储积和应变能积累—释放条件的地（库）段即是可能的诱震场所；

2.4 在确定的可能诱发震地（库）段进行深入、定量的研究，包括仪器观测、模拟试验等，以探索水诱发地震成因及其动力学过程，实现水诱发地震的地点、强度和时等要素的准确预测。

值得指出的是，要突破水诱发地震三要素的准确预测，首先必须做好水诱发地震的总体组合环境条件研究，即要查清楚与诱发地震密切相关的各种环境因素，而且特别强调水域（库）范围内诸多因素的组合分析，探求其三维、动态的诱发地震总体环境系统。这种诱震总体组合环境的研究需要涉及到多种学科，诸如地层学、岩石力学、水文地质学、构造地质与地球物理学等，在研究过程中各个方面（手段）必须密切配合，研究结果必须统一综合，这样才有可能集中地探明区内是否存在产生水诱发地震的总体组合环境条件。反之，如果象以往那样虽形式上强调“多兵种联合”，但实际上是“各自为战”，甚至有时出现种种不协调乃至互相冲突，则是不可能达到预期目标的。

## 3 长江三峡工程区的诱震环境及其水库地震问题

长江三峡工程按正常蓄水位 150—180 m 案，坝顶高程 175—185 m，水库库容  $250 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>。这样高坝巨型水库蓄水后会否引起水诱发地震，一直是众所关注的问题。这里，我们从以上新丰江水库地震的诱发环境条件分析中得到的启示谈一些粗浅认识。

长江三峡工程在大地构造上位于华中地洼区西端<sup>[3]</sup>，该区中生代时期经历过强烈的活动（化）之后，新生代时期地壳构造变动渐趋减弱，特别是晚第三纪以来全区卷入以大面积升降为主的新构造运动中；在此统一的区域构造背影上，现今受 NE—SW 向主压力和地壳—上地幔隆起所产生引张力的联合作用，NNW、NE 和 NW 向断裂及其所分割的构造条块

1) 长江流域规划办公室，长江三峡水利枢纽—治理开发长江的关键工程，1987。

产生错动,形成现代5.5—6.0级的中强地震活动的构造环境<sup>[9]</sup>。

三峡库区处在现代中强地震孕育环境中,即具备了水库地震发生的地震构造条件。因此蓄水后能否诱发地震以及可能的发震地点和强度,则取决于库区是否存在库水渗透—储积条件及其与活动构造组合得当的库段<sup>[4]</sup>。现自坝区向上游选出以下三个库段作些分析,

### 3.1 三斗坪址区

坝址位于鄂西黄陵地穹核部,出露震旦—前震旦系片岩、混合岩、中—酸性侵入岩体组成的结晶杂岩以及冰碛碎屑岩、白云岩等,基本是属弱—不透水层;切割坝区的南北向断裂规模不大,多形成于前震旦纪,现大都已充填固(胶)结,透水性弱<sup>[10,11]</sup>。可见,坝址缺乏良好的库水渗透条件和活动断裂系统,单从其诱震环境条件看,建库蓄水后即使能产生一些诱发地震,其强度也是很小的。

### 3.2 庙河—香溪库段

坝址上游库首区的庙河—新滩—香溪一段,可大致分成两个河谷地貌、岩性组合相似的峡谷区(图2、3):

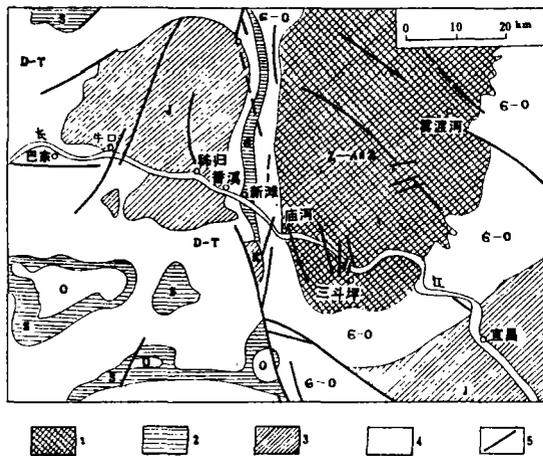


图2 长江三峡三斗坪—巴东段水诱发地震地质环境略图

1. 结晶杂岩(弱透水层); 2. 页岩(不透水层); 3. 砂砾、泥岩(弱透水层); 4. 碳酸盐岩(强透水层); 5. 断裂

Fig. 2 Sketch map of geologic environment for inducing earthquake on the Sandouping—Badong Segment of the reservoir on Changjiang River

九湾溪—路口子段长3—4 km、河床宽100—200 m,两岸山高约1000 m,谷壁坡角 $70^{\circ}$ — $85^{\circ}$ <sup>[11]</sup>;峡谷段由寒武—奥陶系石灰岩组成,有喀斯特溶洞发育,并且在这强透水性岩层的两侧有弱或不透水的变质岩系( $\epsilon_1$ — $A_{nZ}$ )和页岩层( $D_1$ — $S$ )排布,其东侧起隔水作用的地层又延伸到石灰岩层之下;断层裂隙发育,诸如近SN走向的断层和近EW向的顺河向裂隙等,其中通过峡谷的九湾溪断层、路口子断层是现今活动的发震构造<sup>[3,9]</sup>。可见九湾溪—路口子峡谷段的地层岩性和断层裂隙组合形成了一个有利于库水向下渗透(漏)、并能储积起来的封闭系统和与之相配合的构造环境(图3)。

新滩—香溪峡谷段分布石炭—三迭系石灰岩,东西两侧分别为不透水的志留系页岩和透水性弱的侏罗系砂泥岩夹持,其南面仙女山又有透水性不强的白垩系红层阻隔,有利于库水向深处的渗透(漏)(图3)。但与九湾溪—路口子段相比,该段石灰岩中的岩溶和断裂发育要逊色一些(图2)。但总体看来,庙河—香溪库段的诱震环境因素的组合条件是好的,尤其是九湾溪—路口子段,蓄水后有可能诱发较强的水库地震活动。

### 3.3 巴东附近

牛口至东壤口一段,其间包括三迭系石灰岩构成的峡谷区—破水峡。如图2所示:长江南(右)岸分布中厚—薄层石灰岩,倾向 $N15^{\circ}E$ ,倾角 $40^{\circ}$ — $45^{\circ}$ ,层面与长江岸坡一致;

而其北(左)岸则为透水性微弱的砂泥岩(侏罗系和三迭系巴东组)<sup>[11]</sup>。据破水峡两岸所见,沿江石灰岩中垂直裂隙十分发育,牛口附近尚有一系列 NNE 向活动断层通过库区(图 2)<sup>[9,12]</sup>。可见巴东附近长江两侧不同岩性地层配置颇有利于水库水沿石灰岩中断层、裂隙、岩层界面等向深处渗漏,蓄水后有可能诱发 NNE 向活动断裂错动而产生水库地震。

从诱震环境因素的组合条件看:以上三个可能诱震库段中以庙河—香溪段发生区内高强度水库地震可能性最大,巴东附近次之;坝址结晶地段的诱震环境因素(条件)不甚齐全,当然若考虑坝体本身影响及其上下游水压差异等,特别是有争议的顺河向破(断)裂透(漏)水带若能证实存在,则不能排除诱发一些低强度地震的可能性。

在以上宏观分析基础上,我们还对三峡水库诱发地震可能性及其诱震机制进行了一系列模拟计算、诸如库水荷载对断层产生的剪应力的直接作用、库水附加应力对触发较大初始应力的间接作用以及超孔隙水压增加的影响等<sup>[12]</sup>。这些定量研究结果与地质资料分析结论能基本上大致吻合,如图 4 是渐加荷载情况下的超孔隙水压力场在上述分析的三个可能诱震库段三斗坪、香溪、巴东附近分别形成高值椭圆中心,表明诱震区总体环境组合条件研究是评估、预测水诱发地震一条很有效的途径。

关于三峡水库可能诱发地震的强度,也同样应取决于诱震库段的环境因素组合,一是区域地震构造条件,即一定时间段(如工程使用期间)内潜在的孕震能力;二是能使库水发挥最大诱发作用的水文地质条件,包括库水的渗透(漏)—储积环境及其与发震构造的配置组合等条件<sup>[10,11]</sup>。就诱震环境组合条件最佳的庙河—香溪库段来看:通过该库段的近南北向仙女山断裂带预测未来 100 年内可能发生最大地震为 5—1/2 级,诱震峡谷区部分处在 5—1/2 级危险区内<sup>[9]</sup>;另一方面,作为库水的一种渗透通道和释放应变能的近南北向活动断裂带(如属仙女山断裂带的九湾溪断层、路口子断层等)与主河床直交,而通过库区水域的只是很少一段,因此很难最大限度地起诱发作用而集中释放所积累的全部应变能。因此预估可能诱发的最大地震强度不会超过 5—1/2 级<sup>[13]</sup>。

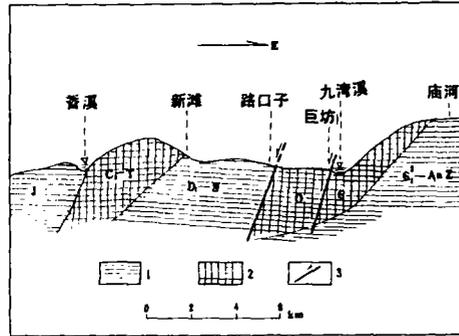


图 3 庙河—香溪库段库水渗透—储积环境剖面示意图

Fig. 3 Profile showing infiltration—storage of water in the reservoir from Miaohe to Xiangxi

1. 隔水层; 2. 透水层; 3. 断层

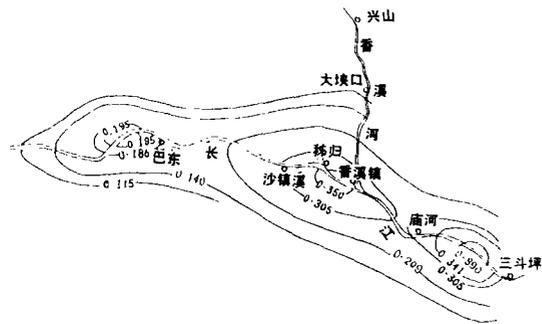


图 4 长江三峡水库 3 公里深 X—Y 平面渐加荷载  $T_0 = 0.5$  年的孔隙压力等值线图(单位:  $n \cdot 10^{10} P_2$ ) (据曾心传等, 1987)

Fig. 4 Isopleth map of pore pressure by X—Y plan load,  $T_0 = 0.5$  year at depth of 3 km in the Three Gorges Reservoir on Changjiang River (Unit,  $10^5 \text{bar}$ ,  $1 \text{bar} = 10^5 P_2$ ) (After zeng Xinchuan, 1987)

## 4 讨 论

4.1 新丰江水库区产生诱发地震是由其特定的地质环境条件决定的:一方面库区及其外围不同性质的岩层(体)、断层裂隙等恰当地排布、组合、造就了库水易于向下渗透(漏)、又能在库底一定深度上储积(存)起来的封闭环境,致令库水有可能发挥其诱发功能;另一方面,库区位于现今活动构造带(区),具备足够高的应力—应变能累积水平和活动断裂作用。因此在水库荷载和入渗库水的参与、迭加作用下,促使库区地壳内所积累的应变能沿活动断裂面释放而产生水库地震。

4.2 库水的渗透(漏)—储积条件和发震的活动构造条件在同一地点(库段)恰当地组合,称之为水库区诱发地震的总体环境组合条件<sup>[4,7,11]</sup>。在开展水库地震研究的这方面的具体工作中,所涉及的各种学科必须协同一致、密切配合,要在统(同)一的思路和共同的目标下从不同方面(角度)研究库区的各种诱震环境因素,最后将其结果集中起来进行总体合成分析,以探明水库区诱发地震的总体环境组合条件,为新(待)建水库的诱发地震可能性预测、评价提供基本依据。

4.3 新丰江水库地震产生的环境条件分析以及在此基础上对长江三峡水库未来诱发地震可能性的讨论表明,查明并探索水库区或其他水域范围内诱发地震的总体环境组合条件是评估、预测水诱发地震中一项很重要的先行工作,因此对新建或待建水利电力工程的水诱发地震的深入(化)、定量研究及其预测等,都应该在其总体环境组合条件调查清楚的基础上进行。

## 参考文献

- 1 王妙月,等.新丰江水库地震的震源机制解及其成因初步探讨.中国科学,1976,(1).
- 2 潘建雄,等.新丰江水库区地震构造及其活动特征.地震地质,1982,4(2).
- 3 丁原章,等.新丰江水库地震的构造条件.地震地质,1983,5(3).
- 4 李安然,等.中国东部四个水库震例的诱震环境因素研究.华南地震,1990,10(3).
- 5 肖安子,等.新丰江水库地震.中国诱发地震,地震出版社,1984.
- 6 陈国达,等.中国大地构造简述.地质科学,1975,(3).
- 7 李安然,等.初探水库地震的形成机理及其诱发环境.华南地震,1987,7(2).
- 8 李安然.长江三峡东段活动发震构造.大地构造与成矿学,1986,10(1).
- 9 李安然,等.长江三峡链子崖黄腊石地质灾害体的地震危险性.中国地质大学出版社,1991.
- 10 李安然,等.长江三峡地区地震地质环境与水库诱发地震问题.地震科学研究,1984,(1).
- 11 李安然,等.长江三峡水库诱发地震的总体环境组合条件.地震科学出版社,1984(1).
- 12 曾心传,等.三峡水库水压应力场、形变场和孔压场研究.长江三峡工程生态与环境的影响及其对策研究论文集,科学出版.1987.
- 13 Nikolaev, N. I., Tectonic condition favourable for causing earthquake occurring in connection with reservoir filling. Eng. Geol., Vol. 8, No. 1/2, 171-189, 1974.

DISCUSSION ON THE PREDICTION OF RESERVOIR—INDUCED  
EARTHQUAKE FROM THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF  
XINFENGJIANG RESERVOIR EARTHQUAKE

Li Anran, Zhang Feifei and Zhang Ke

(Wuhan Institute of Seismology, State Seismological Bureau)

**Abstract**

An earthquake of  $M=6.1$  occurred at Xinfengjiang Reservoir. It is related with the infiltration—storage of water in the reservoir area and the active structure inducing the earthquake. In prediction of reservoir—induced earthquake, we should pay attention to study overall environmental conditions of the reservoir area. A comparison of the combined environmental conditions of xinfengjiang Reservoir and the Three Gorge Reservoir on changjiang River, we suggests that the possibility of reservoir—earthquake at the Sandouping Dam site of the Three Gorge Reservoir is very little, but the environmental factors favourable to inducing earthquake exist on the Miaohu—xiangxi segment of the reservoir where the possibility of earthquake occurrence is great, but the magnitude will not exceed  $M=5\frac{1}{2}$ .

**Key words:** Reservoir—induced earthquake; Environmental factors; Earthquake prediction; Xinfengjiang reservoir; Three Gorge Reservoir on Changjiang River